SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

© BRUNO LEVY POUR SetA
K.ZILMER/UNIVERSITY OF OSLO

I^ER SIÈCLE - DÉCOUVERTE

La plus ancienne pierre runique

p.82

Neurosciences

Les clés du contrôle de soi

p.48

"Orienter notre action mentale"
par Jean-Philippe Lachaux, directeur de recherche Inserm

ChatGPT Les dangers de l'IA

p.28

AVRIL 2023 - N° 914 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / DOM 5,90 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8.60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 914 S - F: 5,30 € - RD

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 914 - AVRIL 2023 - LES CLÉS DU CONTRÔLE DE SOI

CROISIÈRE JAPON

par Voyages d'exception

UNE CROISIÈRE POUR VIVRE DES MOMENTS D'EXCEPTION

DÉPARTS : MARS, OCTOBRE 2023 - MARS 2024

Voyages d'exception vous convie à une croisière unique sur les côtes des îles fascinantes du Japon. Vous explorerez les sites incontournables de cet archipel aux mille légendes, en compagnie de conférenciers, tels que Barthélémy Courmont mais aussi de guides locaux parfaitement francophones qui vous initieront à la culture nippone.

DEMANDEZ NOTRE BROCHURE DÉTAILLÉE

au 01 75 77 87 48, par e-mail à contact@voyages-exception.fr,
sur www.voyages-exception.fr/brochures, (code JAPSC à renseigner)
ou dans votre agence de voyages habituelle.

© L'Agence de Presse - Photos : © Shutterstock

5m

Meta

Avec le métavers, les pompiers seront un jour **équipés pour secourir les personnes plus rapidement**.

Les pompiers utiliseront la réalité augmentée pour mieux s'orienter dans les bâtiments et gagner du temps quand des vies seront en jeu.

Même si le métavers est virtuel, son impact sera réel.

EN SAVOIR PLUS
META.COM/METAVERSEIMPACT/FR

Nos experts sont à vos côtés pour bien gérer vos placements

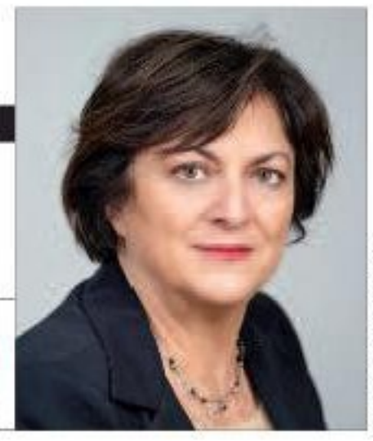
Chez Allianz, 1 200 conseillers experts en gestion de patrimoine sont à vos côtés partout en France pour vous accompagner et vous aider à préparer votre futur avec des solutions épargne, retraite et transmission adaptées.

Pour plus d'informations et prendre rendez-vous avec le conseiller le plus proche de chez vous, rendez-vous sur allianz.fr ou flashez ce QR Code.

Prêts pour demain

Allianz Vie - Entreprise régie par le Code des assurances - S.A. au capital de 643 054 425 € - 340 234 962 R.C.S. Nanterre. Siège social : 1, cours Michelet - CS 30051 - 92076 Paris La Défense Cedex. Document à caractère publicitaire.

Dominique Leglu
Directrice éditoriale



BERNARD MARTINEZ

La théorie de la chauve-souris

Ce n'est pas tous les jours qu'on assiste à la naissance d'une nouvelle science qui bouscule de multiples idées reçues, en préhistoire, géomorphologie, microbiologie, paléoenvironnement… Le mot clé ? Bio-corrosion, un terme qui se développe à grande vitesse depuis deux ans environ. Son héraut, le géoarchéologue Laurent Bruxelles, dont *Sciences et Avenir-La Recherche* suit les découvertes depuis plusieurs années, porte maintenant la bonne parole devant le public, comme récemment au Musée national de préhistoire qui fête son centenaire, aux Eyzies, en Dordogne. Et ce qu'on entend est tout simplement extraordinaire.

Prêt-à-peindre paléolithique. Exemple compréhensible par tous : la spectaculaire frise des lionnes dans la fameuse grotte Chauvet, à Vallon-Pont-d'Arc en Ardèche. Le spécialiste des grottes, médaillé de bronze du CNRS, attire notre attention de profane vers la paroi sur laquelle trônent les félines. Un beau pan de pierre bien lisse, du « prêt-à-peindre » pour nos ancêtres du paléolithique ! Merci qui ? Les chauves-souris passées par là avant l'humain, vraies héroïnes de la bio-corrosion.

Acides et chiroptères. Depuis environ 50 millions d'années que ces petits mammifères volent sur la planète Terre, leurs gigantesques colonies n'ont en effet pas cessé de se suspendre au plafond des grottes. Résultat : beaucoup d'acides ! Carbonique né de leur respiration et de l'humidité ambiante, nitrique issu de leurs urines, sulfurique et phosphorique de leurs déjections.

Psychologie des profondeurs. C'est ici que les spécialistes ont de quoi tomber à la renverse. Là où les préhistoriens faisaient appel à une psychologie (invérifiable) de nos ancêtres préhistoriques afin d'expliquer pourquoi, sous terre, ces derniers avaient peint et gravé ici plutôt que là, voici l'entrée en lice des acides chiroptériques. Ce sont eux, altérant les parois, qui ont pu éliminer de nombreux dessins ou gravures, laissant intacts ceux des zones auxquelles les chauves-souris n'avaient pas accès.

Cloches biogéniques. Quant aux géomorphologues, eux aussi peuvent revoir leur interprétation des formes des grottes. Regarder autrement les creux du plafond en forme de bassines renversées, des « cloches biogéniques » selon la terminologie qui se met au goût du jour. Non des zones érodées par des tourbillons d'antiques rivières souterraines mais l'effet des griffures des animaux et des acides susnommés.

Paysage dans le guano. Et ce n'est pas fini. Dans les couches interminables de guano accumulé sur le sol, se cachent pollens et multiples ADN typiques des environnements au fil des époques. Une grotte proche de celle de Chauvet pourrait ainsi révéler très précisément le paysage dans lequel vivaient nos ancêtres peintres préhistoriques. Elles sont bath, ces chauves-souris qui bousculent les théories ! Preuves vivantes que les connaissances peuvent être étonnamment revues, avec le sérieux scientifique voulu. ■ @dominiqueleglu

COURRIER

Courriels à :
courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr

Fusion nucléaire, l'énergie du futur
(Sciences et Avenir-La Recherche n° 913, mars 2023*)*

■ Votre article sur la fusion nucléaire est intéressant. Mais pourquoi la fusion de deux noyaux de deutérium — un isotope de l'hydrogène — qui donne exactement un hélium n'est-elle pas envisagée ? Le calcul indique que la perte de masse de cette fusion, et donc la production d'énergie, serait 64 fois plus importante qu'avec la solution bore-deutérium. Et elle ne produirait pas de neutron libre susceptible de modifier les caractéristiques physiques des parois du réacteur. En outre le deutérium est quasi inépuisable et disponible partout, ce qui n'est pas le cas du bore. **Jacky Liégeois**

S. et A. : La fusion de deux noyaux de deutérium ne peut produire uniquement un noyau d'hélium 4, car une telle réaction ne satisfait pas aux lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement suite à la collision entre deux particules. Des noyaux de deutérium peuvent néanmoins fusionner, selon deux possibilités de probabilité égale. La première engendre un noyau d'hélium 3, un neutron et une énergie de 3,3 mégaélectronvolts (MeV) ; la seconde, un noyau de tritium, un noyau d'hydrogène et une énergie de 4 MeV. La fusion du deutérium produit ainsi des neutrons : soit directement, soit par le tritium qui fusionne lui-même avec du deutérium, avec une réaction qui deviendra majoritaire. Dans tous les cas, l'énergie libérée est de 3 à 4 MeV, donc inférieure à celle produite par la fusion de noyaux de bore et d'hydrogène (plus de 8 MeV).

Les Vikings et leurs animaux

■ Suite à votre article « les Vikings voyageaient avec leurs animaux » (*S. et A.* n° 913), je sais que le transport d'animaux n'a jamais été un mystère. Ainsi, le site de l'anse aux Meadows en Amérique du Nord a révélé la présence d'os de porc : ceux-ci ne peuvent qu'avoir été transportés par les Vikings. **Jacques Privat**

S. et A. : Les chercheurs à l'origine de cette publication affirment que leur découverte constitue une preuve scientifique solide que les Scandinaves ont traversé la mer du Nord avec des chevaux, des chiens et d'autres animaux dès le IXe siècle de notre ère. De fait, nous aurions sans doute dû parler de « preuve archéologique la plus ancienne » plutôt que de « première preuve archéologique ».

BRIDGEMAN IMAGES

Les drakkars transportaient les chevaux des « Normands », leurs chiens et peut-être même leurs cochons.

Gare aux additifs

■ Dans votre article « Faut-il encore manger de la charcuterie ? » (*S. et A.* n° 913), vous écrivez que certains industriels substituent aux additifs nitrés des bouillons de légumes et que ce procédé, selon l'Anses, ne constitue pas une alternative car les légumes (betteraves, carottes…) en contiennent également. Si ce n'est pas une alternative, c'est que le bilan est, en gros, le même, n'apportant pas au moins une amélioration. Les taux de nitrites/nitrates sont-ils équivalents dans la charcuterie et dans les légumes ? **David Lacroix**

S. et A. : Les végétaux renferment en effet des nitrates qu'ils puisent dans les sols. Ces nitrates, lorsqu'ils sont ingérés, sont convertis en nitrites par l'organisme. Pour cette raison, l'Anses avance d'autres solutions qu'utiliser les bouillons de légumes, comme réduire les dates limites de consommation. Toutefois, les taux de nitrates/nitrites ne sont pas équivalents dans la charcuterie et les légumes. L'Anses estime que pour les nitrates, 62 à 69 % de l'exposition sont associés à la consommation de produits végétaux (épinards, salade). 20 à 25 % des nitrates sont apportés par l'eau de boisson et moins de 4 % proviennent de leur utilisation en tant qu'additifs. L'Anses recommande donc de diversifier la consommation de légumes car certains peuvent montrer des concentrations élevées en nitrates.

Rectificatif

Dans la rubrique « Actualités » (*S. et A.* n° 911, janvier 2023), ce ne sont pas 3,8 millions de barils de pétrole qui sont économisés chaque jour par la voiture électrique, mais 1,5 million.

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

De l'urgence de s'adapter

Le monde a changé. La crise sanitaire, avec son lot de confinements, de deuils, a des effets à long terme : fatigue, perte de motivation, troubles de l'humeur, etc. Les psychiatres évoquent un stress post-pandémique semblable au stress post-traumatique *(p. 50)*, car la question n'est pas que sociale. La science a des choses à dire, aussi bien sur le constat que sur les solutions. Les progrès des neurosciences permettent en effet de mieux comprendre ce qu'il se passe dans le cerveau atteint de « fatigue mentale ». Dans un long entretien *(p. 54)*, le neuroscientifique Jean-Philippe Lachaux nous explique comment reprendre le contrôle… en lâchant prise, pour mieux se fier à nos automatismes cérébraux. Ainsi, nous rétablirons l'harmonie perdue de l'activité des différentes structures cérébrales en jeu, désormais bien identifiées. Mais concrètement, comment faire ? Nous vous présentons des techniques qui ont fait leurs preuves en psychologie, dans une partie très pratique *(p. 59)*. Ne reste plus qu'à s'en emparer ! Le monde a changé, il faut s'adapter. Il en a toujours été ainsi du vivant. Mais nous avons cette chance que les clés de l'adaptation sont connues. *Sciences et Avenir-La Recherche* vous les livre. Avec une promesse de bien-être inédit : le *flow*, *« un état idéal recherché par tous les athlètes, qui peut être vécu par tout le monde, où tout paraît facile et évident »*, assure Jean-Philippe Lachaux.

> « Les progrès des neurosciences permettent de comprendre ce qu'il se passe dans le cerveau atteint de « fatigue mentale » »

Autre changement auquel il est urgent de commencer à s'adapter : les intelligences artificielles conversationnelles. L'impact des futures IA de type chatGPT n'est pas encore clair, mais il sera majeur. Si la conscience de ces agents relève du fantasme *(p. 28)*, leur incroyable efficacité pour nous donner l'illusion d'être face à une véritable intelligence va changer une quantité d'activités. Car ces IA ont une capacité à manier des volumes de données bien supérieure au cerveau humain. Comme nombre d'outils auparavant, elles feront de nous des humains un peu plus « augmentés ». À condition de savoir les contrôler, elles aussi. ■ @mathieu_nowak

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD, Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, SYLVIE BENZONI
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, S. BRIET, C. COUMAU, N. DURBECQ, C. JOURDAN, P. KALDY, E. SENDER, E. TISSANDIÉ
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOUIN - directrice numérique déléguée
Jessica RIOS - responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Mélanie HENOU - mhenou@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un encart « Montre Chronographe Origin Vuillemin Regnier - Sophia Boutique », un message « Historia » ainsi qu'une lettre de « bienvenue aux abonnés » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés. Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00369636. Distribué par MLP.

bouygues TELECOM

BETC Bouygues Telecom – Société anonyme au capital de 929 207 595,48 € – Siège social : 37-39, rue Boissière – 75116 PARIS – 397 480 930 RCS PARIS.

On n'arrêtera jamais de faire tomber nos smartphones.

Pour les faire durer plus longtemps, nous baissons le prix de leur réparation pour nos clients et leurs proches, jusqu'à deux fois par an.

Nos conseillers vous accueillent dans nos **500 boutiques Bouygues Telecom.**

solutions smartphone durable

RÉPARÉ · REPRIS · RECONDITIONNÉ · RECYCLÉ

Remise de 30% valable sur deux réparations par an, pour les clients Forfait Bouygues Telecom (engagement 12/24 mois) ou une personne de leur choix, auprès de notre partenaire WeFix en boutiques. Conditions sur bouyguestelecom.fr. Kit mains-libres recommandé.

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 914 / Avril 2023

DOSSIER P. 48

Les clés du contrôle de soi

Les années Covid ont engendré une fatigue mentale chez nombre de Français. Mais rien d'irreversible, car la neurobiologie nous explique comment le cerveau alterne entre mode automatique et mode volontaire, et quelles stratégies suivre pour relâcher la pression et retrouver un bon contrôle de soi.

P. 28

IA consciente : le retour d'un fantasme

Les performances de l'agent conversationnel ChatGPT font sensation sur Internet. De quoi réactiver les débats sur une possible conscience de l'intelligence artificielle. Décryptage.

P. 38

Engrais : l'avenir de l'agriculture passe par l'urine

La France vient d'autoriser la commercialisation du premier engrais à base d'urine humaine, dont la collecte généralisée permettrait d'économiser au moins 20 % des engrais chimiques.

P. 76

Ötzi : le nouveau portrait de l'homme des glaces

Trente ans après la mise au jour de la momie sur un glacier alpin, les découvertes sur cet homme du néolithique et sur les conditions de sa mort brutale s'accumulent.

7 **Éditorial** par Dominique Leglu

8 **Courrier**

9 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

12 **ACTUALITÉS** En route pour les lunes océans de Jupiter / Un télescope sous-marin traque les neutrinos

28 **IA consciente : le retour d'un fantasme**

33 **La couleur des vitraux éclairée par la physique**

36 **Des super-Terres fabriquées à la chaîne**

86 **Dossier spécial cybersécurité**

NATURE

16 **ACTUALITÉS** Les baleines changent de stratégie de séduction / Des graines qui se plantent toutes seules

38 **Engrais : l'avenir de l'agriculture passe par l'urine**

44 **Briser les digues pour sauver le littoral**

SANTÉ

20 **ACTUALITÉS** Deux nouveaux patients guéris du sida / Un échographe miniaturisé pour le cœur

66 **Soigner la dépression par l'assiette**

70 **Une micropompe contre les maladies de la lymphe**

74 **Nutrition : pourquoi les fibres sont si importantes**

HISTOIRE

24 **ACTUALITÉS** Voici le tunnel caché de la pyramide de Kheops / Des outils bien avant « sapiens »

76 **Ötzi : le nouveau portrait de l'homme des glaces**

82 **Une pierre gravée pourrait réécrire l'histoire des runes**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

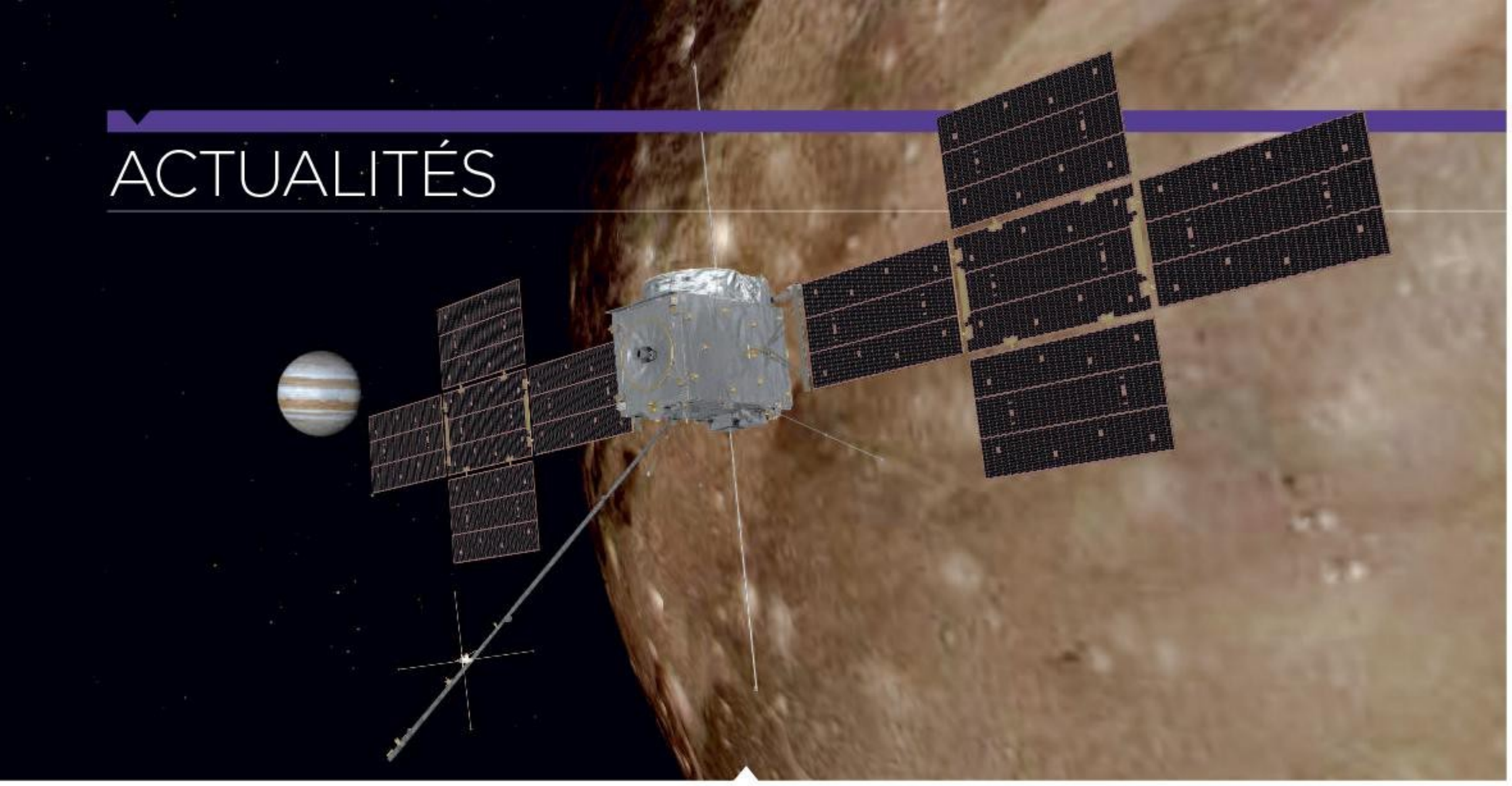
93 **Le ciel d'avril**

94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Jeux**

GETTY IMAGES - GETTY IMAGES - COURTESY OCAPI - SOUTH TYROL MUSEUM OF ARCHAEOLOGY/EURAC RESEARCH / MARION LAFOGLER



La sonde européenne orbitera autour de Ganymède (vue d'artiste), qui abrite un gigantesque océan sous sa surface gelée.

ESA/ATGMEDIALAB

En route pour les lunes océans de Jupiter

La mission Juice survolera à partir de 2031 Callisto, Europe et Ganymède. Elle restera en orbite autour de cette dernière pendant près d'un an.

Décollage à partir du 13 avril! L'Agence spatiale européenne s'apprête à lancer sa prochaine grande mission d'exploration spatiale à destination des lunes galiléennes glacées de Jupiter. Juice (pour JUpiter ICy moon Explorer) aura pour mission d'étudier le potentiel d'habitabilité de Callisto, Europe et en particulier Ganymède, censées abriter d'immenses océans. Pour arriver autour de la géante gazeuse, en juillet 2031, la sonde devra compter sur l'assistance gravitationnelle de la Terre et de Vénus, avec un dernier tour de notre planète prévu en janvier 2029. Une fois sur place, Juice survolera à plusieurs reprises Callisto, Europe et Ganymède pour les passer au crible de ses dix instruments (spectromètre, radar, caméra, magnétomètre, etc.). Elle achèvera sa mission, à partir de décembre 2034, avec Ganymède, la plus grosse lune du Système solaire, autour de laquelle elle restera en orbite durant près d'un an.

Avec son relief varié, une structure interne complexe dont un noyau liquide ferreux, un océan sous la surface et plusieurs autres caractéristiques uniques, *« Ganymède intéresse toutes les communautés scientifiques concernées par la planétologie »*, souligne Olivier Grasset, du Laboratoire de planétologie et géosciences de Nantes Université. Principal attrait de l'astre : son gigantesque océan. *« On estime que l'hydrosphère, qui se compose du manteau glacé et de l'océan liquide, mesure au moins 500 kilomètres d'épaisseur! Soit à peu près 50 % de la masse de ce corps, tandis que l'eau sur Terre constitue à peine 0,01 % de la masse. Il y a donc une quantité phénoménale d'eau »*, enchérit Olivier Grasset.

Une lune potentiellement habitable

L'hypothèse du « sandwich » veut que l'or bleu soit piégé entre deux manteaux de glace à plusieurs dizaines de kilomètres de profondeur. Le milieu intéresse grandement les astrobiologistes qui étudient les conditions d'apparition de la vie sur Terre et l'habitabilité des autres corps célestes. Avec des molécules organiques et de l'énergie disponible fournie par des cryovolcans ou des cheminées hydrothermales, l'océan de Ganymède possède indéniablement un potentiel d'habitabilité. Mais habitabilité ne signifie pas présence de vie. Au terme de son investigation, Juice, à court de carburant, devrait s'écraser sur Ganymède. Il est toutefois possible que les ingénieurs décident de procéder à un crash contrôlé qui permettra de récupérer et d'envoyer des informations jusqu'à ce que la sonde touche le sol, comme cela avait été le cas pour la sonde Cassini, qui avait achevé sa mission en s'enfonçant dans l'atmosphère de Saturne. ■ J. I.

ELLE A DIT

« La mission Dart a démontré qu'on peut altérer efficacement la trajectoire d'un astéroïde, ce qui constitue une étape importante pour notre capacité à protéger la Terre d'une menace d'astéroïde »

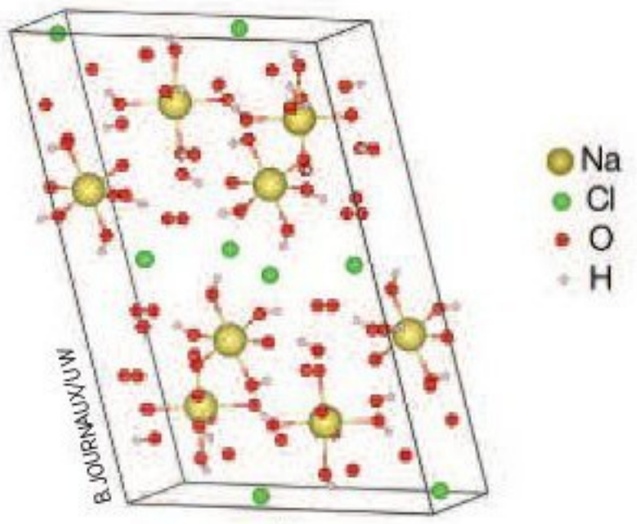
Yun Zhang, chercheuse en aérospatiale à l'université du Maryland (États-Unis) et coauteure d'une série d'études validant le succès de la mission Dart.

Des cellules photovoltaïques à base de matériaux lunaires

INGÉNIERIE La société américaine Blue Origin développe un procédé pour fabriquer des panneaux solaires sur la Lune, en utilisant uniquement des éléments présents à sa surface. Baptisé Blue Alchemist, il utilise des analogues de la poussière lunaire — le régolithe — chauffés à plus de 1600 °C et soumis à des courants électriques. Les métaux contenus dans ce matériau meuble se séparent alors de l'oxygène, pour produire notamment du silicium pur à 99,99 %. **F. D.**

BLUE ORIGIN

Ce prototype de cellule solaire a été conçu à partir d'analogues de régolithe.



La structure du cristal comporte deux molécules de sel (boules jaunes et vertes) et 17 d'eau (boules rouges et roses).

Une nouvelle forme de glace salée

CHIMIE En étudiant le comportement d'un mélange d'eau et de sel (chlorure de sodium) à basses températures et à des pressions très élevées, une équipe a découvert deux types inédits de glace salée. L'un d'eux, qui recèle 17 molécules d'eau pour deux de chlorure de sodium, correspond à la signature chimique détectée par les télescopes à la surface d'Europe, une des lunes de Jupiter. **F. D.**

SOURCE : BAPTISTE JOURNAUX, UNIVERSITÉ DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.

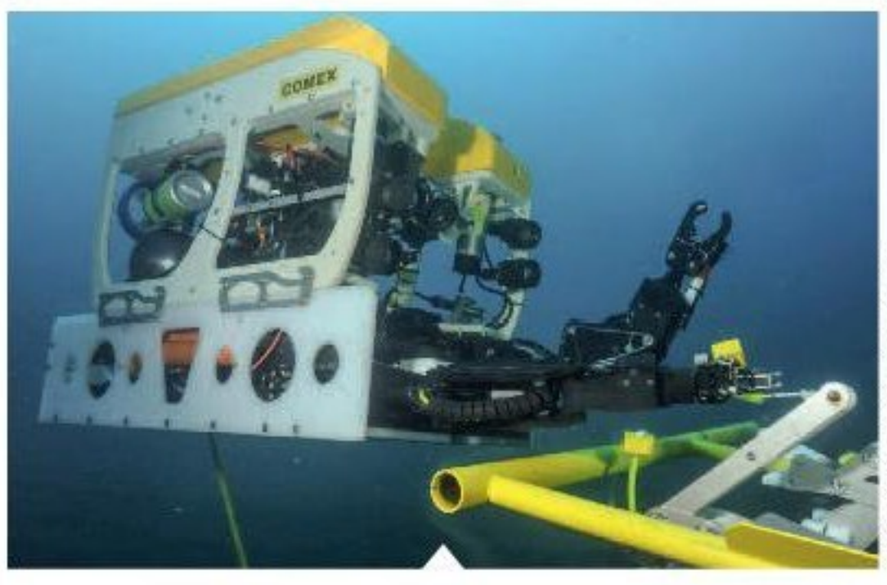
EN DEUX MOTS

FUSÉE Le lanceur spatial japonais de nouvelle génération H3 a échoué à décoller en raison d'une défaillance de ses propulseurs d'appoint, a fait savoir l'agence spatiale nippone. **TRANSPORTS** Tesla a procédé au rappel de 362 000 véhicules aux États-Unis en raison du risque de manœuvres illégales ou imprévisibles d'un logiciel de conduite autonome. **CHIMIE** En utilisant des bactéries, une équipe suisse a développé une encre pour imprimante 3D qui se minéralise au séchage, permettant par exemple la restauration de statues.

Un télescope sous-marin traque les neutrinos

Le Laboratoire sous-marin Provence Méditerranée va analyser ces particules en provenance du cosmos.

À 2450 mètres de profondeur, au large de Toulon, le Laboratoire sous-marin Provence Méditerranée (LSPM) du CNRS, copiloté avec Aix-Marseille Université et l'Ifremer, vient d'être inauguré. Il constitue une ressource unique pour l'étude des fonds marins… et du cosmos! Son instrument principal, le télescope KM3NeT, a ainsi été conçu pour détecter les neutrinos, ces particules insaisissables qui interagissent très faiblement avec la matière. Pour les repérer, des lignes de photodétecteurs, disposées sur un volume dépassant le kilomètre cube, guetteront la faible lueur produite lorsqu'ils disparaissent après avoir traversé la Terre. L'autre axe de recherche développé par le LSPM s'articule autour de plusieurs instruments qui évalueront les effets du changement climatique et les impacts des activités humaines sur l'océan profond. **J. I.**



COMEX, CNRS/PHOTOTHEQUE IN2P3

KM3NeT est installé à 2450 mètres de profondeur, à 40 kilomètres au sud de Toulon.

Frida, l'IA artiste peintre

ROBOTIQUE Baptisé Frida en hommage à la célèbre artiste mexicaine Frida Khalo, ce bras robotique articulé est connecté à une intelligence artificielle capable de suivre des instructions données par un humain — texte en langage naturel, photo, croquis, style recherché — pour se saisir d'un pinceau et réaliser la commande. **A. D.**

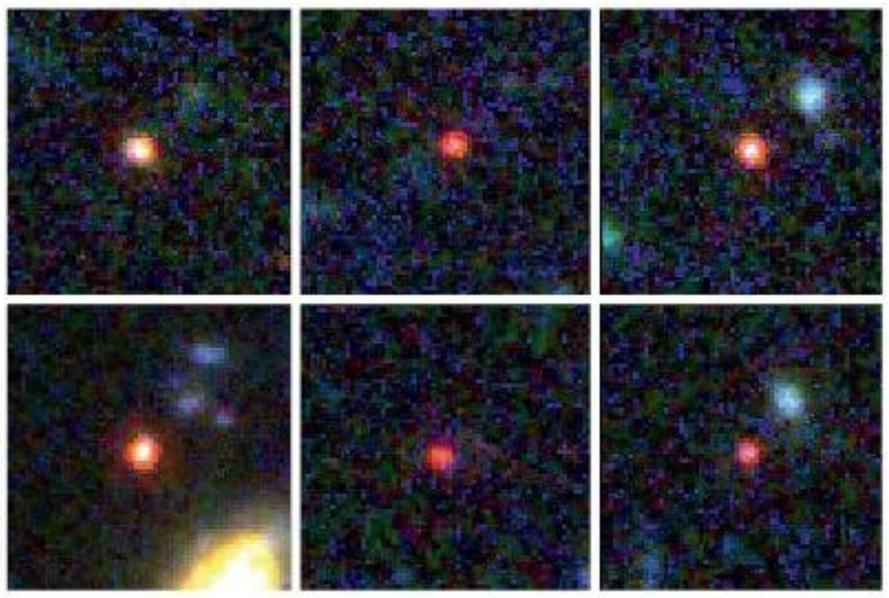
SOURCE : UNIVERSITÉ CARNEGIE-MELLON, PITTSBURGH, ÉTATS-UNIS.

CARNEGIE MELLON UNIVERSITY

Le robot est capable de produire une image en suivant les instructions d'un humain.

Des galaxies massives dans l'Univers jeune

Leurs caractéristiques pourraient remettre en question le modèle cosmologique actuel.



NASA, ESA, CSA, I. LABBE

Les six galaxies vues 500 à 700 millions d'années après le Big Bang par le télescope spatial James-Webb.

Publiées dans la revue *Nature* du 22 février, ces taches rougeâtres pourraient révolutionner l'histoire de notre univers. Il s'agit de six galaxies « photographiées » par le télescope spatial James-Webb, lorsque l'Univers avait entre 500 et 700 millions d'années, soit 3 % de son âge actuel. Or *« ces objets sont bien plus massifs que prévu »*, a déclaré Joel Leja, astrophysicien à l'université de Pennsylvanie (États-Unis) et coauteur de la publication. *« Nous nous attendions à ne trouver que des bébés galaxies, mais nous avons découvert des galaxies aussi matures que la nôtre. »* La plus massive atteint 100 milliards de masses solaires, autant que la Voie lactée, mais elle serait 30 fois plus compacte. Si ces caractéristiques étaient confirmées, les modèles de formation des galaxies seraient à revoir de fond en comble. **F. N.**

Anniversaire de l'encyclopédie des suites d'entiers

MATHÉMATIQUES **Il y a cinquante ans naissait la première encyclopédie de séquences de nombres entiers. Derrière les 2372 suites de l'ouvrage, se trouve le mathématicien britanno-américain Neil Sloane, qui n'a eu de cesse de faire évoluer sa collection. Aujourd'hui accessible en ligne*, elle comporte 360 000 séquences. Une mine pour les mathématiciens et ceux qui veulent s'amuser avec les nombres. C. M.**

* sciav.fr/914nombres

Les secrets d'une mousse parfaite

PHYSIQUE Des physiciens ont mis au point un modèle numérique pour prédire les caractéristiques de la mousse de bière (hauteur, stabilité, rapport mousse/liquide), en fonction de la composition du breuvage, de la bouteille, du verre. Ils ont expérimenté un versement du bas vers le haut qui permet de réduire le temps d'écoulement de la bière dans le verre, tout en obtenant une mousse parfaite. **F. N.**

SOURCE : THOMAS SCHELLIN, UNIVERSITÉ DE DUISBURG-ESSEN, ALLEMAGNE.

THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA

NASA/JPL-CALTECH/MSSS

Curiosity capte les vaguelettes fossiles d'un ancien lac martien

PLANÉTOLOGIE Lors de son ascension du mont Sharp, qui culmine à 5000 m d'altitude sur Mars, le rover Curiosity de la Nasa a photographié des structures ridées sur le sol, formées par les courants et des mouvements d'eau en bordure d'un lac qui existait sur la planète Rouge il y a plusieurs milliards d'années. *« C'est la meilleure preuve d'eau et de vagues que nous ayons vue de toute la mission »*, se réjouit Ashwin Vasavada, responsable scientifique de Curiosity. **F. D.**

ON VOIT MIEUX LA JOIE DANS NOS NOUVELLES BOUTEILLES TRANSPARENTES

SOURCE BADOIT 1778 FINEMENT PÉTILLANTE
EAU MINÉRALE NATURELLE DE Saint-Galmier
AVEC ADJONCTION DE GAZ CARBONIQUE 1L

SANS LEUR COULEUR, NOS BOUTEILLES PEUVENT À PRÉSENT INTÉGRER LA FILIÈRE DE RECYCLAGE PERMETTANT LA PRODUCTION DE NOUVELLES BOUTEILLES.

HORS BOUCHON. EN SAVOIR PLUS SUR BADOIT.FR

BETC - S.A.E.M.E. Evian - RCS 797 080 850 Thonon

Non, les serpents ne sont pas sourds

HERPÉTOLOGIE En observant le comportement de 19 serpents d'espèces différentes soumis à des sons de fréquences variables, une étude montre que ces reptiles dépourvus d'oreilles visibles et de tympans peuvent percevoir les sons dans l'air. Jusqu'ici, seule était connue leur audition tactile à travers les vibrations du sol captées par les écailles de leur ventre. **A.-S. T.**

SOURCE : CHRISTINA ZDENEK, UNIVERSITÉ DU QUEENSLAND, AUSTRALIE.

Science citoyenne au service des fleurs

CREA MONT-BLANC

Les volontaires effectuent des relevés en montagne.

PHÉNOLOGIE À l'heure où pointe le printemps, le Centre de recherches sur les écosystèmes d'altitude (Crea) lance un appel aux citoyens, invités à partager leurs constats des dates d'ouverture des bourgeons et de floraison des plantes — la phénologie — des six massifs montagnards français. Ce programme de sciences participatives (phenoclim.org), qui entame sa 26e édition, se concentre sur 13 espèces végétales très sensibles au changement climatique. **L. C.**

TONY WU/NATUREPL/EBPHOTO

Décimées par la chasse au XXe siècle, les baleines à bosse d'Australie utilisaient le chant pour attirer les femelles. Aujourd'hui, la population s'est reconstituée et adopte des tactiques alternatives.

Les baleines changent de stratégie de séduction

Des chercheurs ont observé que les baleines à bosse privilégient l'affrontement physique au chant quand la densité de mâles augmente.

Pour séduire leur partenaire, les baleines à bosse mâles passent petit à petit du chant à l'affrontement physique. C'est le constat fait dans la revue *Communications Biology* par deux chercheuses australiennes, Rebecca Dunlop et Celine Frere. Pour mener leur étude, elles ont utilisé un ensemble de données récoltées de 1997 à 2015 sur une population de baleines à bosse, au large de la plage Peregian du Queensland en Australie. Ces cétacés avaient été décimés par des pratiques de chasse avant les années 1960, ne laissant qu'environ 200 individus à la fin des années 1970. Pour réussir à se retrouver dans l'océan et régénérer leur population, les baleines ont davantage utilisé leur technique de chant. Celle-ci s'est révélée particulièrement efficace, puisque sur la période étudiée, le nombre d'individus est passé de 3700 en 1997 à 27 000 en 2015.

Ne pas attirer l'attention de la concurrence

Les chercheuses ont observé qu'à mesure que la population se rétablissait, les mâles adaptaient leur comportement reproductif. Les résultats de leur étude suggèrent qu'ils choisissent de chanter lorsque la densité locale de mâles est faible, et préfèrent un comportement « non chantant » lorsque cette même densité augmente ou qu'un autre mâle commence à chanter, pour ne pas attirer la concurrence et risquer de perdre leur partenaire. Plusieurs stratégies sont possibles. L'individu peut choisir de partir à la recherche d'une autre femelle, rester passif dans le cercle de mâles, ou entrer en confrontation physique par des bousculades ou des combats. « *On peut voir des coups de tête en surface où une baleine essaie d'en frapper une autre, d'autres se pourchassant* », décrit Rebecca Dunlop. Fort heureusement, cette adaptation des mâles ne signifie pas pour autant la disparition du chant des baleines, qui ont d'autres occasions de donner de la voix. **E. T.**

EN DEUX MOTS

PÊCHE L'Union européenne programme l'interdiction progressive du chalutage de fond dans toutes les zones marines protégées d'ici à 2030. **BIODIVERSITÉ** Le loup fauché par une voiture à Fontainebleau (Seine-et-Marne) n'était pas de souche italienne mais polonaise, une origine qui démontre la forte capacité de dispersion de l'espèce. **POLLUTION** Une étude estime à 170 000 milliards le nombre de morceaux de plastique à la surface des océans et alerte sur des « niveaux sans précédent » de pollution depuis 2005.

Les chiens errants de Tchernobyl ont muté

ÉVOLUTION Les premières analyses génétiques conduites sur trois populations de chiens errants s'étant reconstituées autour de la zone d'exclusion de Tchernobyl (Ukraine) montrent que les animaux vivant au plus près de la centrale accidentée ont des niveaux de radioactivité plus élevés que les autres. Les trois populations s'avèrent génétiquement différentes, non seulement des chiens errants communs mais également entre elles. L'étude est la première étape d'une vaste exploration de ces populations isolées depuis près de quarante ans dans un environnement très mutagène. H. R.

SOURCE: GABRIELLA SPATOLA, UNIV. DE CAROLINE DU SUD, ÉTATS-UNIS.

GLEB GARANICH / REUTERS

L'effet des radiations sur le génome des canidés vivant dans la zone d'exclusion de l'ancienne centrale nucléaire fait l'objet d'une grande étude.

Contre le méthane, une greffe fécale de bébé kangourou

POLLUTION Des chercheurs ont implanté des fèces de bébés kangourous dans un estomac artificiel de bovin. Après quelques mois, ce simulateur ne produisait plus de méthane, mais de l'acide acétique, comme les petits kangourous. Ce dernier, inoffensif pour le climat, favoriserait aussi la croissance musculaire des bovins en plus de les rendre moins polluants. **R. M.**

SOURCE: SUPRIYA KAREKAR, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.

Des graines qui se plantent toutes seules

La technique permettrait de répandre les semences depuis les airs à l'aide de drones.

Une équipe de l'université Carnegie Mellon aux États-Unis s'est inspirée de plantes à graines auto-enfouissantes, capables de s'enfoncer seules dans la terre, pour mettre au point un porte-graine de plantage. Pour concevoir leur dispositif en forme d'hélice, les chercheurs ont utilisé du bois de chêne blanc qui réagit aux changements d'humidité tout en restant assez rigide pour enfoncer une graine dans le sol. L'équipe a pour cela mis au point un traitement chimique permettant au bois de s'enrouler puis, en réaction à l'humidité, d'exercer une force de torsion pour enfoncer les graines dans le sol. La technique permettrait de semer les graines depuis les airs à l'aide de drones dans le cadre de projets de replantation de forêts. Testé avec des graines de moutarde, le dispositif a permis l'ancrage au sol de 66 % d'entre elles. Perfectible, mais supérieur aux attentes des chercheurs. **H. J.**

CARNEGIE MELLON UNIVERSITY

Le porte-graine est conçu en bois de chêne blanc traité pour s'enrouler sur lui-même et s'enfoncer dans la terre en réaction à l'humidité.

BIOSPHOTO

La femelle voit son rythme circadien modifié après le coït.

Le « jet lag » de la drosophile après l'accouplement

ENTOMOLOGIE Une étude montre qu'un peptide sexuel, une protéine du liquide séminal des drosophiles mâles, provoque *« une sorte de* jet lag *»* chez les femelles : augmentation de la ponte, faible réceptivité à d'autres accouplements, immunité, morphologie, métabolisme et mémoire… L'analyse révèle que le peptide modifie l'activité génétique des femelles de plusieurs heures à plusieurs jours. A.-S. T.

SOURCE: SOFIE DELBARE, UNIVERSITÉ CORNELL, ÉTATS-UNIS.

Des vitres productrices d'électricité

ÉNERGIE Des vitres photovoltaïques, c'est la promesse d'une équipe de l'université de Picardie Jules-Verne, qui a inventé des cellules solaires transparentes *(photo)*. Elles peuvent s'intégrer dans des doubles vitrages pour produire de l'électricité. L'innovation vient d'être financée pour un développement industriel d'ici à 2025. **L. C.**

F.SAUVAGE

14125

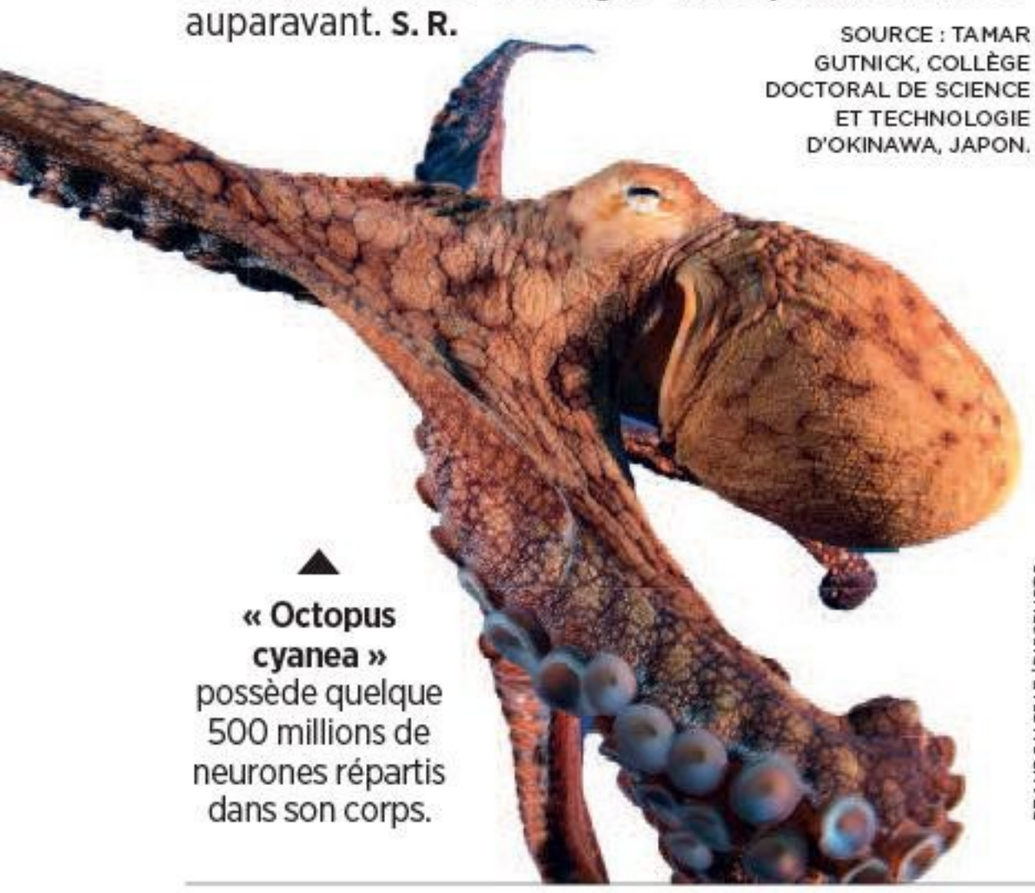
Le nombre revu à la hausse d'îles nippones

GÉOGRAPHIE **À l'occasion d'une campagne de cartographie de la superficie totale du Japon, l'Autorité d'information géospatiale du pays a comptabilisé 7273 îles de plus qu'au dernier comptage (6852). Et encore, les scientifiques n'ont retenu que celles d'une circonférence supérieure à 100 mètres parmi les quelque 100 000 détectées. H. J**

L'activité cérébrale des poulpes à la loupe

ÉTHOLOGIE Afin de mieux comprendre le comportement des poulpes, des chercheurs ont réussi pour la première fois à enregistrer les ondes cérébrales de trois pieuvres en mouvement, en leur implantant des électrodes et un petit enregistreur de données. Ils ont ainsi identifié des oscillations lentes de longue durée jamais décrites auparavant. **S. R.**

SOURCE : TAMAR GUTNICK, COLLÈGE DOCTORAL DE SCIENCE ET TECHNOLOGIE D'OKINAWA, JAPON.



BRANDON COLE/BIOSPHOTO

« Octopus cyanea » possède quelque 500 millions de neurones répartis dans son corps.

SAAD BHAMLA, GEORGIA TECH COLLEGE OF ENGINEERING

L'insecte évacue par jour un volume d'urine équivalent à 500 fois son poids.

L'étonnante catapulte de la cicadelle pisseuse

ENTOMOLOGIE Afin de se débarrasser efficacement de ses gouttes d'urine, *Homalodisca vitripennis* (ou cicadelle pisseuse) se sert de son clapet anal comme catapulte. Cette astuce permet à l'insecte invasif du sud de l'Amérique se nourrissant de la sève des feuilles d'éliminer chaque jour un volume d'urine équivalent à 500 fois son poids. **H. R.**

SOURCE : ELIO CHALLITA, GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ÉTATS-UNIS.

Faciliter la symbiose arbres-champignons

Une équipe française vient de montrer le rôle de l'épigénétique dans cette association essentielle aux écosystèmes forestiers.

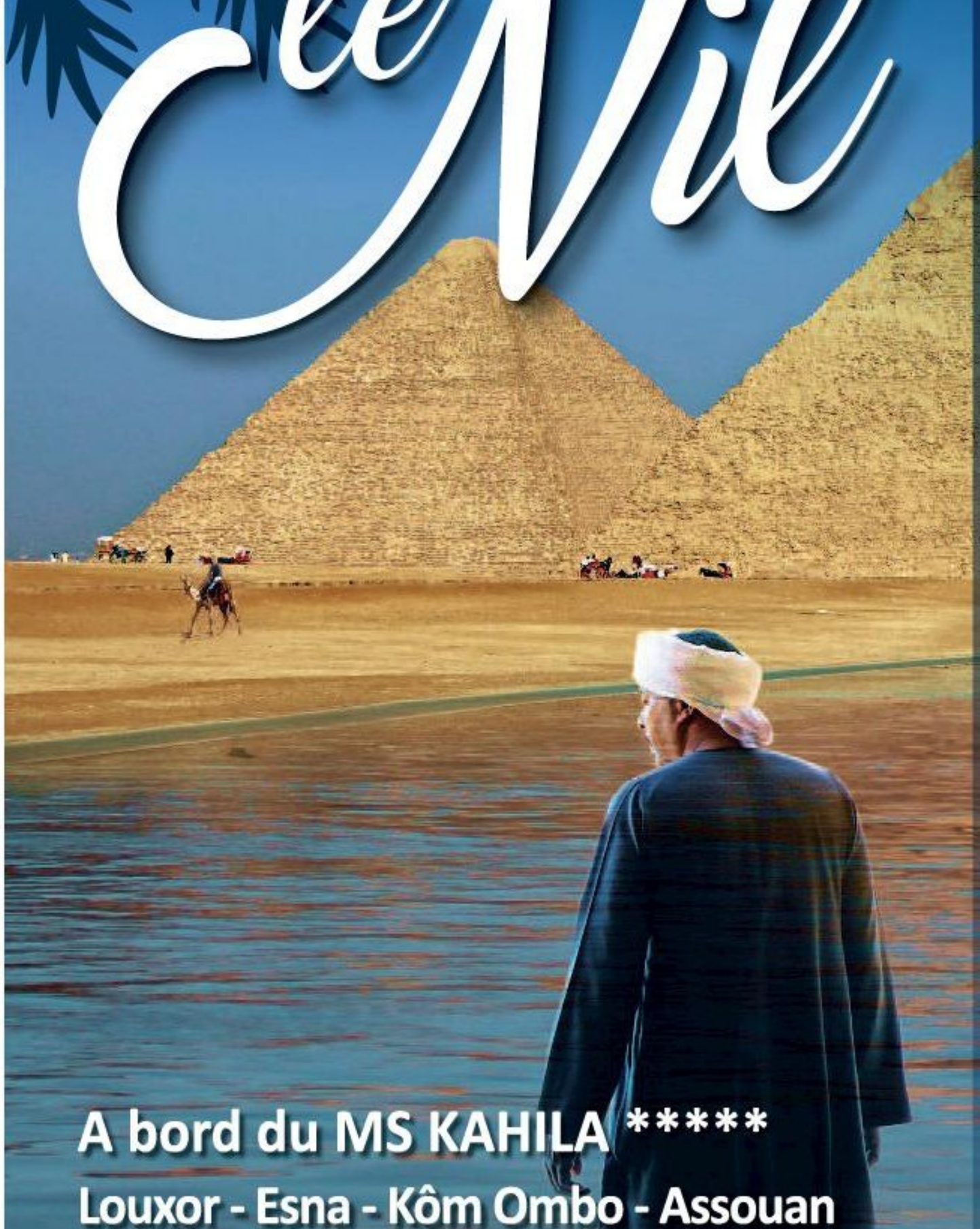
JEAN-PHILIPPE DELCOBELLE/BIOSPHOTO

La coopération entre arbres et champignons s'effectue par les racines et les filaments.

La symbiose entre champignons et arbres, appelée ectomycorhize, est fortement influencée par l'environnement, au point d'induire dans leur génome respectif des modifications épigénétiques sur l'ADN : des groupements chimiques se greffent dessus et modulent l'expression des gènes. C'est le phénomène de méthylation que viennent de montrer deux équipes de l'Inrae d'Orléans et de Nancy. Les chercheurs ont créé des lignées de peupliers transgéniques à l'ADN plus ou moins méthylé et une lignée témoin au patrimoine épigénétique « sauvage », où la méthylation est à un niveau naturel. Ils les ont appariés au laccaire, un champignon répandu des forêts tempérées. Et ils ont comparé les souches. Résultat : *« Les lignées moins méthylées ont montré jusqu'à plus de 40 % de baisse du potentiel symbiotique, ce qui est énorme »*, révèle Stéphane Maury, du Laboratoire de biologie des ligneux et des grandes cultures (Inrae/université d'Orléans). Cette découverte publiée dans *New Phytologist* ouvre un nouveau champ de recherche, notamment pour l'adaptation des arbres aux sécheresses. **L. C.**

DU 22 AU 30 NOV. 2023

CROISIÈRE SUR le Nil



A bord du MS KAHILA *****

Louxor - Esna - Kôm Ombo - Assouan
Le Caire et son nouveau Musée

9 JOURS / 8 NUITS

A PARTIR DE **2 790 €/PERS. EN TOUT INCLUS** (1)

AVEC LA PARTICIPATION DE (2)
PASCAL VERNUS, Egyptologue
CHRISTIAN GRATALOUP, Géohistorien
YASMINE FOUAD, Ministre de l'environnement
DOMINIQUE LEGLU, Directrice éditoriale de SCIENCES et AVENIR

MAGIQUE EGYPTE

Amis de Sciences et Avenir et de La Recherche, songez que, du haut de ces pyramides, quarante siècles d'histoire vous contempleront ! Il n'est même pas besoin de paraphraser la déclaration de Bonaparte à ses soldats pour rappeler la fascination que la civilisation égyptienne continue d'exercer sur notre imaginaire.

Hiéroglyphes, Champollion, momies, Kheops, Toutankhamon, Akhenaton, Nefertiti... tous ces noms continuent d'avoir pour nous une résonance fabuleuse.

Le voyage de huit jours à l'automne 2023 - en compagnie de deux scientifiques français exceptionnels que les lecteurs de Sciences et Avenir - La Recherche connaissent bien, l'égyptologue **Pascal Vernus** et le géo-historien **Christian Grataloup** - permettra de découvrir (ou redécouvrir) les pyramides de Gizeh et le Sphinx, mais aussi le grand musée du Caire. Ce plus vaste musée d'égyptologie au monde abritera désormais les joyaux telles la collection complète du trésor de Toutankhamon, l'immense barque solaire du pharaon Kheops et pas moins de 100.000 antiquités traduisant l'imaginaire envoûtant des Egyptiens, toujours à la conquête de l'immortalité. A partir de Louxor, nous aurons ensuite le plaisir de voguer pendant quatre jours sur ce fleuve nourricier qu'est le Nil, dont les crues ont été la clé du développement de cette civilisation dans une zone aride. Et pourrons visiter des lieux aussi mythiques que la vallée des Rois, le temple de Hatchepsout mais aussi Abou Simbel, dont le sauvetage des deux temples fut la plus grande opération archéologique du XXe siècle. **Embarquez donc avec nous pour un voyage qui promet des moments magiques !**

Dr Dominique Leglu
Directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche, pôle Sciences du groupe Challenges.

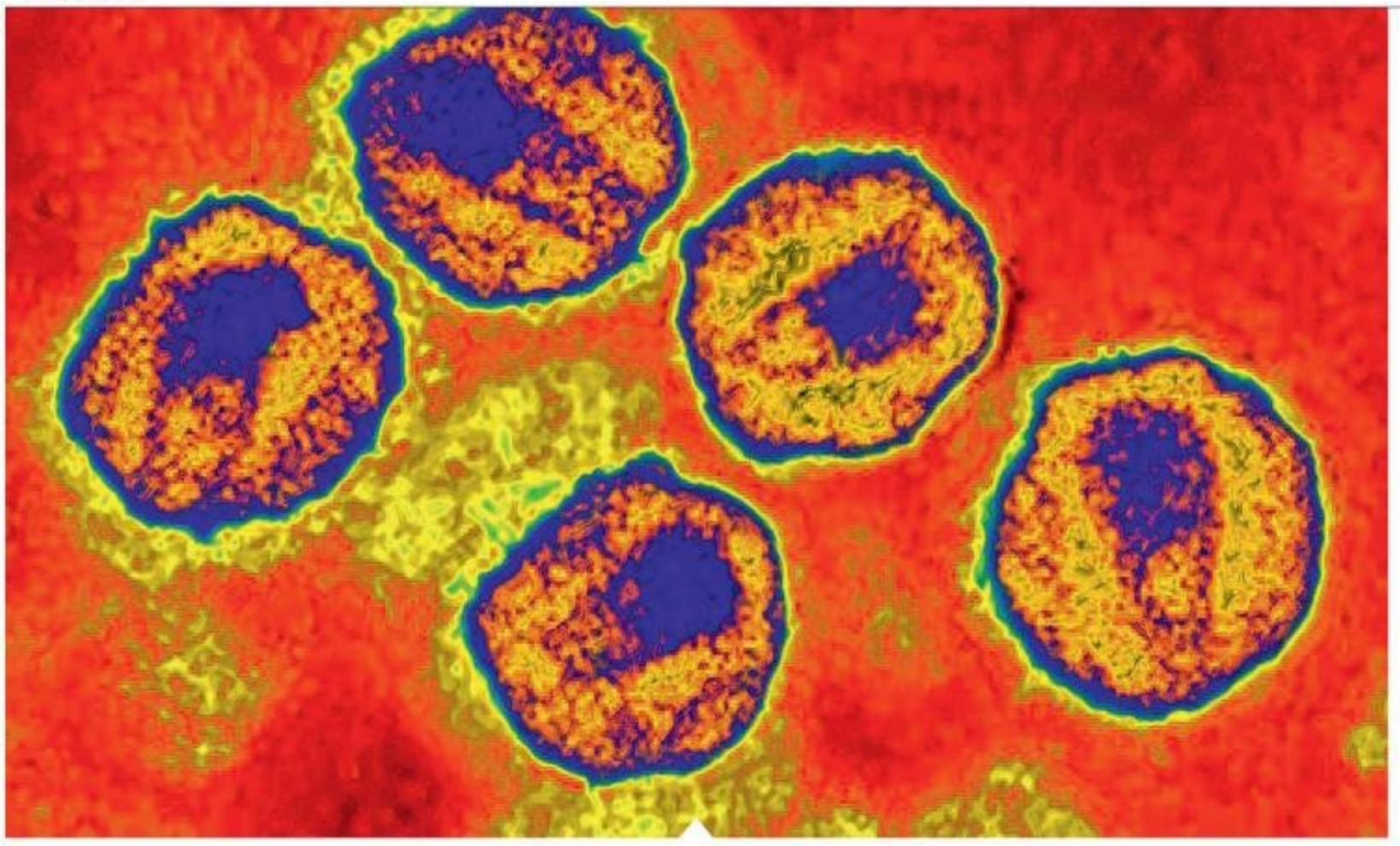
UN ÉVÈNEMENT EXCLUSIF

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur www.sa-egypte.fr
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | collection-infini@mycomm.fr

(1) Voir détails sur la brochure (2) Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400



J.C AVALLINI/BSIP

Le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) est responsable de la mort de plus de 40 millions de personnes dans le monde. Il affecterait actuellement 38,4 millions de personnes environ.

Deux nouveaux patients guéris du sida

Une greffe de cellules de donneurs porteurs d'une mutation génétique rare a permis d'immuniser les malades contre le virus.

Deux nouveaux cas de guérison du sida ont été rapportés coup sur coup par deux équipes, l'une à l'hôpital de Düsseldorf (Allemagne), l'autre à New York (États-Unis). Ce sont les troisième et, possiblement, quatrième cas attestés de disparition du VIH (virus de l'immunodéficiencce humaine) après le « patient de Berlin » en 2012 et le « patient de Londres » en 2019. Tous ont bénéficié d'une situation rarissime : d'abord testés positifs au VIH, ils se voient diagnostiquer une leucémie quelques années après. Seul espoir contre ce cancer mortel : une greffe de moelle osseuse — ou de cellules souches dans le cas de la « patiente de New York ». Les médecins allemands et américains ont ainsi cherché des donneurs porteurs d'une mutation génétique rare, qui immunise ses porteurs contre le VIH. Présente chez 1 % de la population seulement, elle modifie le récepteur de surface CCR5 dont le virus se sert pour pénétrer les cellules. Or, peu à peu, après la greffe, les patients héritent de la mutation CCR5 de leur donneur. Opéré en 2013, le « patient de Düsseldorf » a ainsi pu stopper ses antirétroviraux contre le sida en 2018 et ne présente plus de trace du virus depuis quatre ans.

La « patiente de New York » est plus particulière. D'abord parce qu'elle a reçu une greffe de cellules souches CCR5 delta-32 issues de sang de cordon ombilical, et non de moelle osseuse ; ensuite parce qu'il s'agit d'une personne métisse. « *Il est rare que des personnes de couleur trouvent un donneur suffisamment apparié,* précise Yvonne Bryson, qui a dirigé cet essai. *L'utilisation de cellules de sang de cordon élargit les possibilités pour ces personnes.* »

Une procédure qui reste exceptionnelle

Pour autant, la procédure ne pourra pas être généralisée, prévient Björn Jensen, infectiologue référent du « patient de Düsseldorf » : « *Elle entraîne un risque de complications mortelles qui ne permet pas de la justifier contre le VIH, lequel peut être traité sur le long terme* », grâce aux antirétroviraux notamment. **H. J.**

ELLE A DIT

« L'insomnie et le fait de dormir moins de cinq heures par nuit devraient être considérés comme un facteur de risque isolé d'infarctus et faire l'objet d'un dépistage plus fréquent »

Yomna Dean, première auteure d'une étude menée sur plus d'un million de personnes pendant neuf ans, mesurant un risque cardiaque 69 fois supérieur chez les insomniaques.

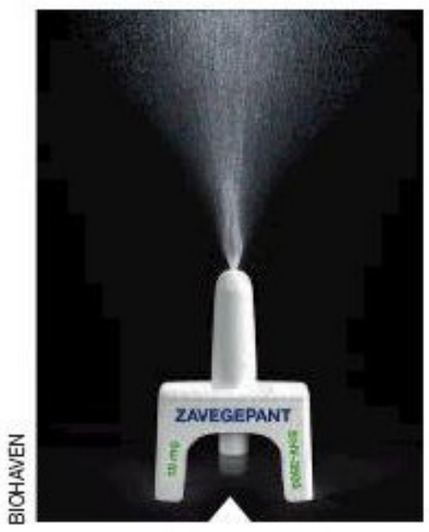
UNIVERSITY OF ROCHESTER

La femelle peut se reproduire toute sa vie.

La fertilité sans limite du rat-taupe nu

MÉDECINE Une équipe a découvert que les femelles rats-taupes nus, espèce pouvant vivre trente ans, possèdent une réserve ovarienne qui leur permet de se reproduire tout au long de leur vie, sans connaître de baisse de fertilité. Une singularité chez les mammifères qui pourrait avoir des débouchés en médecine de la reproduction humaine pour protéger la fonction ovarienne ou prolonger la fertilité. **H. J.**

SOURCE: MIGUEL ANGEL BRIEÑO-ENRÍQUEZ, UNIVERSITÉ DE PITTSURGH, ÉTATS-UNIS.



BICHAVEN

Le médicament serait efficace au bout de 15 min.

Un spray nasal contre la migraine

THÉRAPEUTIQUE Les autorités américaines viennent d'autoriser un spray nasal contre la migraine. La molécule, le zavegepant, est un anticorps monoclonal (lire *S. et A.* n° 883) commercialisé par le laboratoire Pfizer sous le nom de Zavzpret. Une étude de phase 3 menée sur 1405 personnes a montré une réduction de la douleur migraineuse au bout de quinze minutes. **S. R.-M.**

47 % La part des Français en surpoids

ÉPIDÉMIOLOGIE **Une étude menée par l'Inserm montre que les Français sont de plus en plus gros: 17 % seraient obèses, avec des pics atteignant 20 % dans les Hauts-de-France ou le Grand Est. Si la tendance se renforce depuis quinze ans, c'est chez les plus jeunes (18-24 ans) que l'augmentation est la plus forte.** **H. R.**

SOURCE : ANNICK FONTBONNE, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, FRANCE.

L'effet bouba-kiki expliqué par les neurosciences

NEUROSCIENCES Grâce à une modélisation mathématique de notre perception des sons, une équipe a élucidé l'universalité de l'effet bouba-kiki ; à savoir qu'au mot « bouba » sera toujours associée une forme ronde, tandis que « kiki » évoquera une forme pointue. Un invariant qui tient à la physique des objets, montre l'étude : lorsqu'un objet rond roule, il va produire un son continu plus proche du « bouba », tandis qu'un objet à arêtes donnera un son de type « tak tak tak », que l'on retrouve dans « kiki ». **C. G.**

SOURCE : MATHILDE FORT, CENTRE DE RECHERCHE EN NEUROSCIENCES DE LYON, FRANCE.

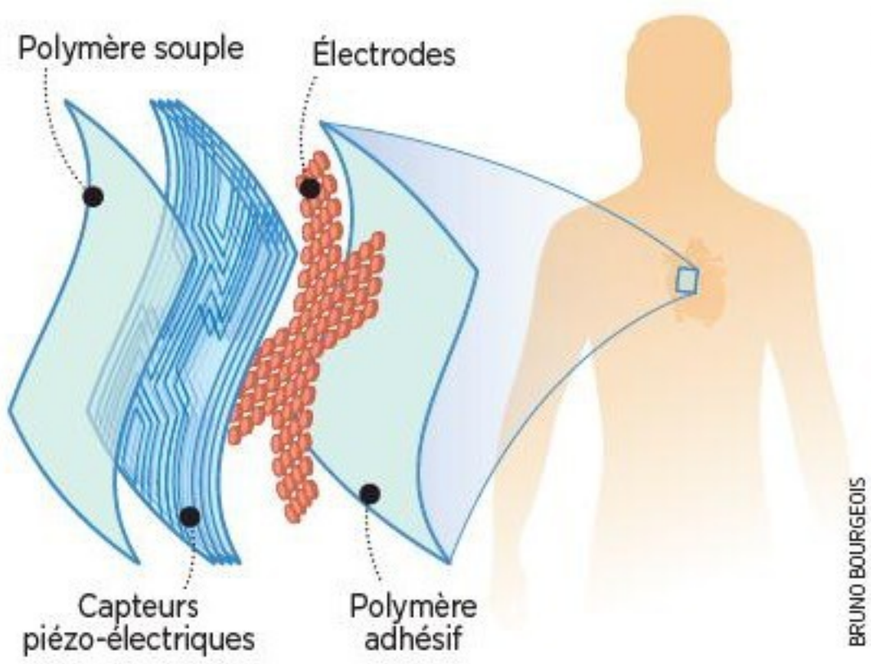
Le mot bouba est toujours associé à une forme arrondie, kiki à une forme pointue.

© BENDZH-CC BY-SA 3.0

Un échographe miniaturisé pour le cœur

Ce patch adhésif envoie des ultrasons de la peau vers les cavités cardiaques, oreillettes et ventricules.

Petit mais efficace, voici un dispositif médical de la taille d'un timbre-poste à coller sur la poitrine à la place d'une sonde d'échographie cardiaque, présenté dans la revue *Nature*. Cet échographe miniature portable a été mis au point par une équipe de nano- et bio-ingénieurs de l'université de Californie à San Diego (États-Unis). Le secret de sa miniaturisation ? De minuscules capteurs piézo-électriques inclus dans un patch adhésif qui envoient des ultrasons directement de la peau vers le corps, tout comme les sondes des échographes classiques. Les ondes renvoyées permettent de détecter les organes, ici les cavités cardiaques, oreillettes et ventricules. Les données acquises sont ensuite transformées en images. Dans sa configuration actuelle, les auteurs précisent que le patch doit encore être connecté par des câbles à un ordinateur, mais l'équipe développe un modèle sans fil qui devrait faire l'objet d'une prochaine publication. **S. R.-M.**



BRUNO BOURGEOIS

Le dispositif de la taille d'un timbre-poste récolte les données cardiaques du patient.

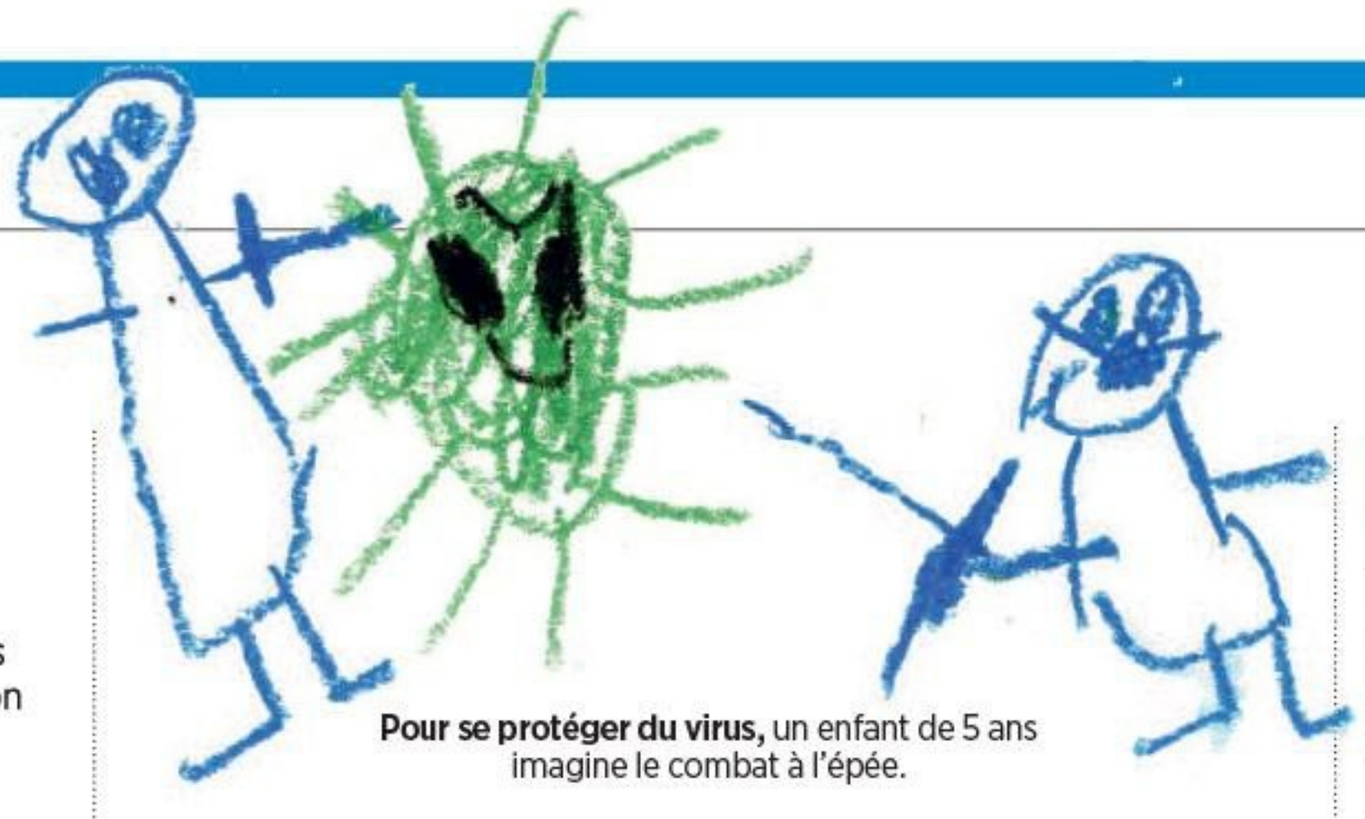
Une thérapie génique contre l'hémophilie

HÉMATOLOGIE **L'Europe vient de donner son feu vert à la première et unique thérapie génique dans le traitement de l'hémophilie B, un trouble génétique de la coagulation. L'étranacogène dézaparvovec, commercialisé sous le nom d'Hemgenix par les laboratoires CSL Behring, consiste en une perfusion unique libérant 94 % des patients de celles, coûteuses, actuellement utilisées pour traiter la maladie. Son prix, particulièrement élevé aux États-Unis, 3,5 millions de dollars, n'est pas encore connu en France.** **S. R.-M.**

Une bactérie contre le retard de croissance

MICROBIOTE Chez des souris en sous-nutrition chronique, l'ajout à leur microbiote d'une bactérie, *Lactiplantibacillus plantarum*, a permis une reprise de croissance en stimulant la prolifération des cellules souches de l'intestin, montre l'étude. Une piste à suivre contre les retards de croissance qui apparaissent chez les enfants malnutris. **H. R.**

SOURCE : MARTIN SCHWARZER, ENS DE LYON, FRANCE.



Pour se protéger du virus, un enfant de 5 ans imagine le combat à l'épée.

SWEDISH ARCHIVE OF CHILDREN'S ART

Le coronavirus croqué par les enfants

PSYCHOPÉDIATRIE Une équipe suédoise a recueilli et étudié 91 dessins d'enfants de 4 à 6 ans, réalisés pendant la pandémie de Covid-19, entre avril 2020 et février 2021. Ils témoignent notamment d'une connaissance approfondie de la maladie acquise par les enfants au cours de la pandémie. *« Tu vomis, tu tousses, puis tu te sens mieux ou tu meurs »*, commente l'un d'eux devant son dessin, dans une sorte d'algorithme clinique. Un autre remonte une chaîne de transmission avec un code couleur très précis… Ils dévoilent aussi leurs astuces pour se protéger, jusqu'au… combat à l'épée. **H. J.**

SOURCE : ANNA SARKADI, UNIVERSITÉ D'UPPSALA, SUÈDE.

62

Le nombre de mots par minute exprimés grâce à une interface cerveau-machine

NEUROSCIENCES C'est le nouveau record de vitesse établi par une patiente paralysée, s'exprimant grâce à un implant cérébral connecté à une machine qui décode les signaux dans son cerveau. Le précédent record était de 15 mots par minute. **C. G.**

SOURCE : FRANCIS WILLETT, UNIVERSITÉ STANFORD, ÉTATS-UNIS.

Un capteur intelligent prévient l'extinction de voix

PHONIATRIE Destiné aux chanteurs ou aux enseignants en premier lieu, un dispositif évaluant la fatigue des cordes vocales a été mis au point pour prévenir l'extinction de voix. Positionné en haut du thorax, un capteur enregistre les vibrations des cordes vocales et mesure différents paramètres (fréquence, volume, amplitude). Relié en Bluetooth à un smartphone, il prévient l'utilisateur en cas de « surchauffe ». S. R.-M.

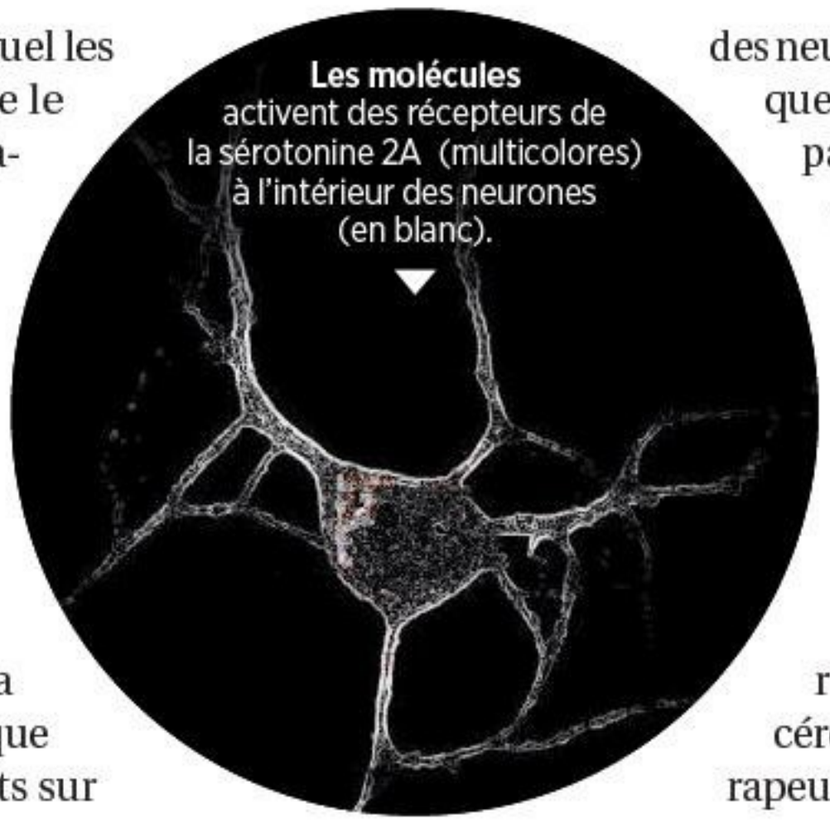
SOURCE : HYOYOUNG JEONG, UNIVERSITÉ NORTHWESTERN, ÉTATS-UNIS.

NORTHWESTERN UNIVERSITY

Comment les psychédéliques remodèlent le cerveau

Certaines drogues favorisent la plasticité cérébrale : une solution thérapeutique prometteuse en psychiatrie.

Le mécanisme moléculaire par lequel les drogues psychédéliques comme le lysergide (LSD), la diméthyltryptamine (DMT) ou la psilocybine des champignons hallucinogènes favorisent la plasticité cérébrale vient d'être élucidé dans la revue *Science* par une équipe de l'université de Californie à Davis (États-Unis). Une percée scientifique qui intervient alors que la recherche clinique en psychiatrie est très dynamique autour de ces molécules — la psilocybine est déjà autorisée contre la dépression et le stress post-traumatique *(lire* S. et A. *n° 900)*. Ici, à partir de tests sur des neurones *in vitro*, les chercheurs montrent que les psychédéliques ont une façon très particulière de cibler le récepteur de la sérotonine 2A (5-TH2AR) dans le cerveau : la chimie de ces molécules leur permet de traverser la membrane cellulaire pour agir à l'intérieur des neurones, où les récepteurs 5-TH2AR sont plus concentrés qu'en surface. C'est ce qui explique la capacité de ces molécules à régénérer et remodeler des connexions neuronales. Ce récepteur intracellulaire de la plasticité cérébrale pourrait ainsi être une cible thérapeutique prometteuse en psychiatrie. **H. R.**



Les molécules activent des récepteurs de la sérotonine 2A (multicolores) à l'intérieur des neurones (en blanc).

DAVID OLSON/UC DAVIS

COMPLÉMENTAIRE SANTÉ

UNE DÉPENSE DE SANTÉ IMPRÉVUE ?

RÉGLEZ ÇA EN UN COUP DE FIL.

UN PROBLÈME DENTAIRE, DE VUE OU D'AUDITION ?
AVEC NOTRE COMPLÉMENTAIRE SANTÉ MODIFIABLE SUR SIMPLE APPEL ET SANS DÉLAI DE CARENCE, MAÎTRISEZ VOTRE BUDGET.

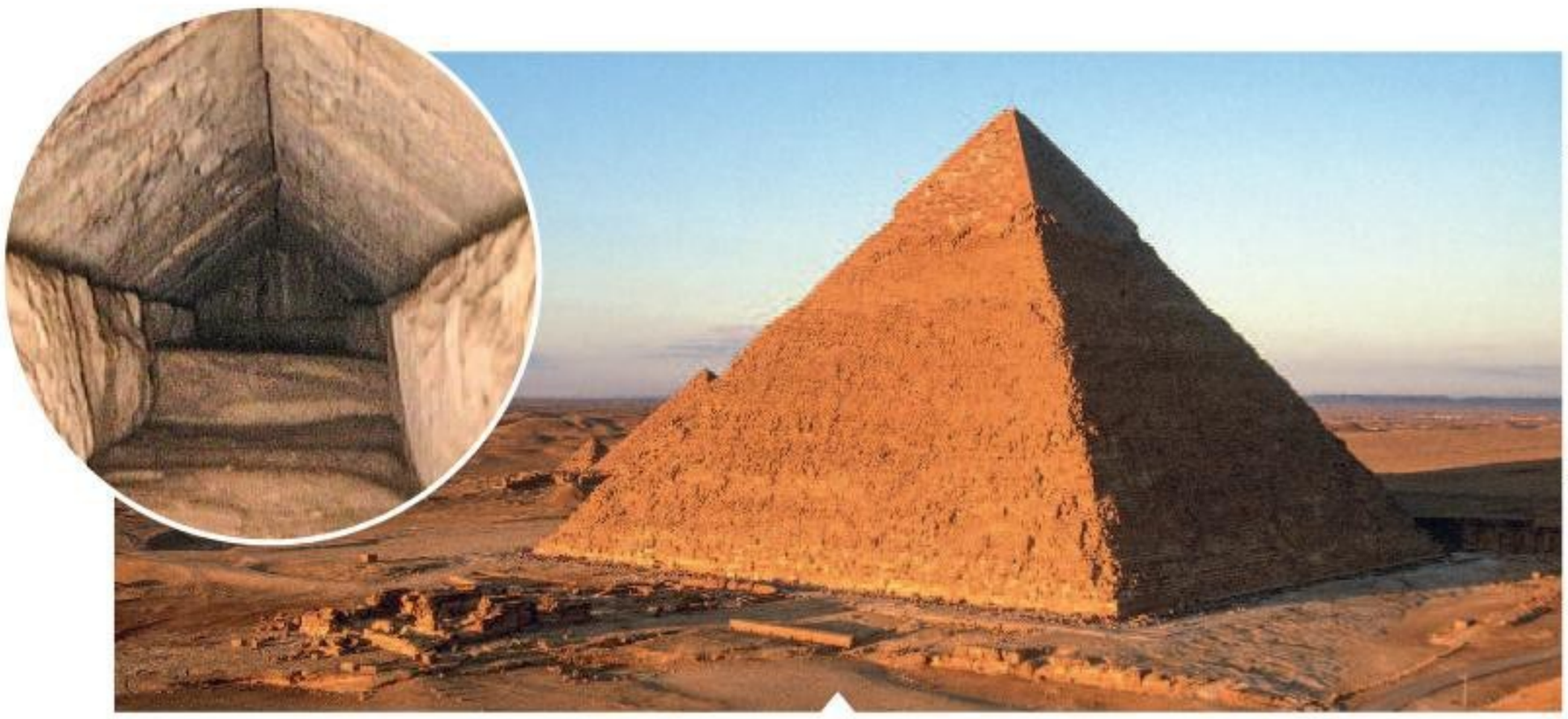
AGIR CHAQUE JOUR DANS VOTRE INTÉRÊT ET CELUI DE LA SOCIÉTÉ

Les contrats d'assurance santé sont assurés par PACIFICA, filiale d'assurances dommages de Crédit Agricole Assurances. PACIFICA, S.A. au capital entièrement libéré de 442 524 390 €, entreprise régie par le Code des Assurances. Siège social : 8-10, boulevard de Vaugirard - 75724 Paris Cedex 15. 352 358 865 RCS Paris. Contrats d'assurance distribués par votre Caisse régionale de Crédit Agricole, immatriculée auprès de l'ORIAS en qualité de courtier. Les mentions de courtier en assurance de votre Caisse régionale sont disponibles sur www.mentionscourtiers.credit-agricole.fr ou dans votre agence Crédit Agricole. Sous réserve de la disponibilité de cette offre dans votre Caisse régionale.

03/2023 – Édité par Crédit Agricole S.A., agréé en tant qu'établissement de crédit – Siège social : 12, place des États-Unis, 92127 Montrouge Cedex – Capital social : 9 077 707 050 € – 784 608 416 RCS Nanterre. Crédit photo : Léo Bigiaoui. BETC

Voici le tunnel caché de la pyramide de Kheops

Une caméra endoscopique a permis de visualiser ce couloir mystérieux situé au-dessus de l'entrée nord.



A. LORGNIER/ONLY FRANCE/AFP - EGYPTIAN MINISTRY OF ANTIQUITIES/AFP

Long d'environ 9 m et large de plus de 2 m, le couloir, situé au-dessus de l'entrée nord de la Grande Pyramide (Gizeh, Égypte), ne comporte pas d'issue.

En 4500 ans, soit depuis la construction de la dernière merveille du monde antique encore debout, personne n'avait jamais pénétré dans cette salle. Sans doute doit-on plutôt parler d'un couloir, localisé au-dessus de l'entrée nord de la pyramide de Kheops, en Égypte, celle-là même par laquelle les touristes pénètrent dans l'édifice. Les membres de la collaboration internationale ScanPyramids, coordonnée par la faculté d'ingénierie du Caire et par l'Institut HIP, soupçonnaient sa présence depuis 2016, après l'obtention de données recueillies grâce à des détecteurs de muons, des radars et des ultrasons. Le ministère des Antiquités égyptiennes a fini par en dévoiler des images exceptionnelles, capturées cette fois à l'aide d'une simple caméra endoscopique qui a été glissée dans les interstices de la pierre.

On y distingue le tunnel vide, long d'environ 9 mètres, surmonté d'un plafond en chevrons. Débouche-t-il sur une autre salle cachée ? Impossible de le dire pour l'instant. De la même manière, sa fonction reste un mystère, mais les chercheurs peuvent d'ores et déjà entrevoir, à leur grande déception, qu'il s'agit d'un cul-de-sac. Il y a quelques années, ils avaient en effet imaginé que la pièce pouvait communiquer avec un autre espace, identifié cette fois en 2017 : le fameux « Big Void », ou « grand vide ». Cette cavité, beaucoup plus grande que le corridor photographié, pourrait mesurer 30, voire 35 m de long pour une section de 3 m de large par 3 m de hauteur.

La confirmation de l'existence de ce couloir « aveugle » n'en est pas moins palpitante pour l'équipe de ScanPyramids, qui, avec cette découverte, a désormais la certitude que la muographie est une technique aux résultats fiables, ce dont certains archéologues doutaient. Avant de pouvoir admirer des images du Big Void, il faudra néanmoins s'armer de patience : très en profondeur, loin de la grande galerie et du moindre couloir, il s'annonce très difficile à sonder. **M. B.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

VLA AMS ERFGOED CENTRUM

La cruche du XVIe siècle contenait urine, ongles, clous...

Découverte d'une « bouteille de sorcière » en Belgique

ARCHÉOLOGIE Daté de la fin du XVIe siècle, ce récipient découvert en 2020 était rempli d'une sombre mixture révélée à l'analyse : urine, cheveux, rognures d'ongles, clous, crochets en métal... Un contenu typique des « bouteilles de sorcière » habituellement retrouvées dans l'est et le sud de l'Angleterre et destinées à piéger les présumées jeteuses de sorts. C'est la première découverte du genre en Belgique. **S. d. L.**

SOURCE : D. VAN DEN NOTELAER, UNIV. LIBRE DE BRUXELLES, BELGIQUE

IL A DIT

« Chez moi, elle est dans ma chambre, elle dort avec moi, je m'occupe d'elle. Elle est comme ma petite amie spirituelle »

Julio Cesar Bermejo, Péruvien de 26 ans, arrêté alors qu'il transportait à vélo, dans un sac de livraison de repas, une momie préhispanique âgée de 600 à 800 ans, prétendument rapportée au domicile par son père trente ans auparavant. Le ministère de la Culture du Pérou a repris possession de la précieuse relique.

48H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER
LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

GRAND OCEAN

29 ET 30 SEPT. 2023

À LA CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN

& EN DIGITAL

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

CHERBOURG en Cotentin

leCotentin
COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION

Partenaires Associés

LA MANCHE
LE DÉPARTEMENT

RÉGION
NORMANDIE

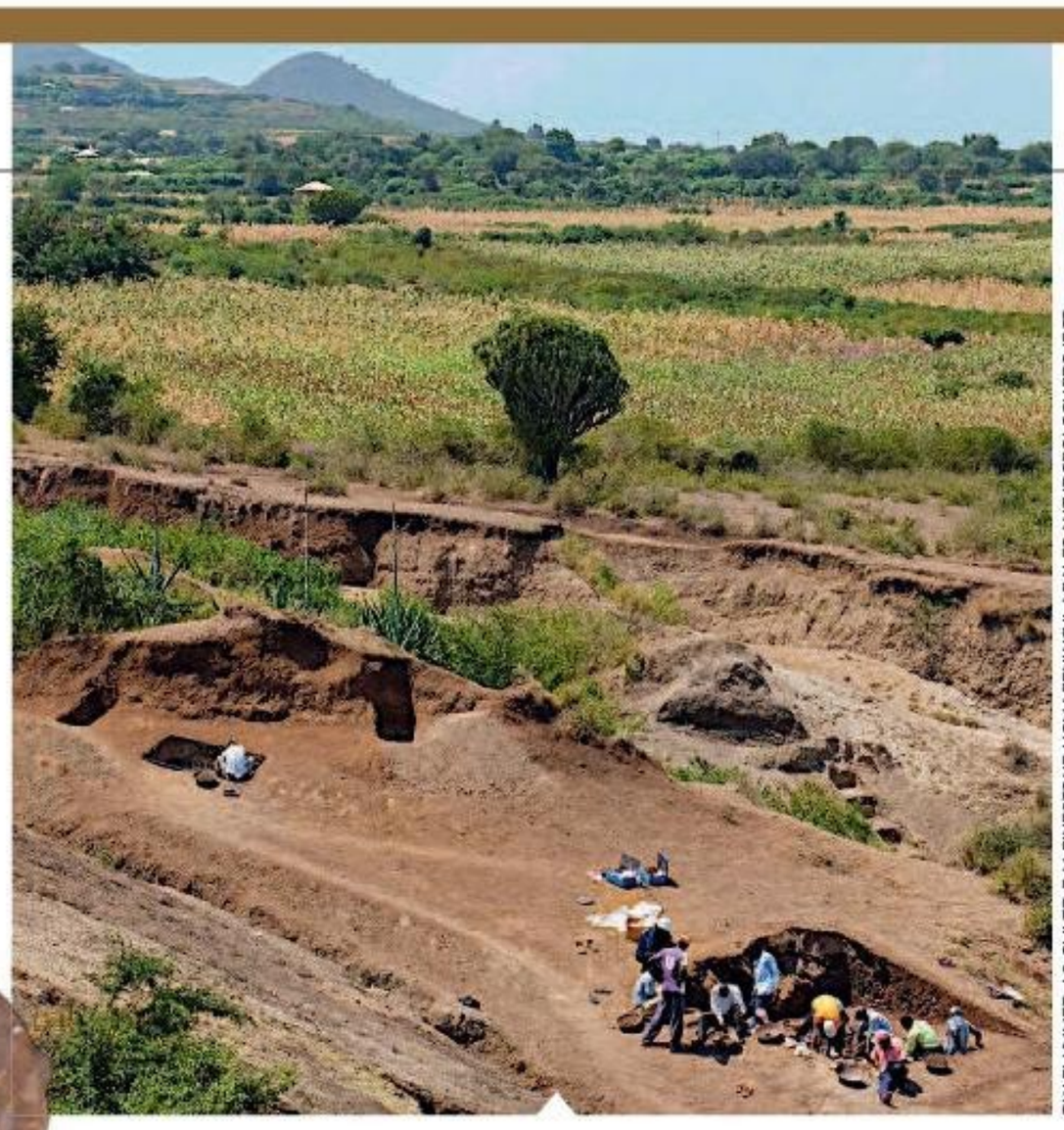
Organisé par

Les Echos
Le Parisien
ÉVÉNEMENTS

SCIENCES AVENIR
La Recherche

Des outils bien avant « sapiens »

Ces objets vieux peut-être de 3 millions d'années ont été découverts au Kenya.



T.W. PLUMMER, J.S. OLIVER, E.M. FINESTONE, HOMA PENINSULA PALEOANTHROPOLOGY PROJECT

Le site archéologique de Nyayanga abrite 330 artefacts en pierre, des outils destinés à débiter de la viande et broyer des végétaux.

C'est le plus vieil ensemble d'outils jamais retrouvé après celui découvert en 2012 sur le site de Lomekwi, au Kenya. Pas moins de 330 artefacts lithiques ont été sortis de terre en 2016 à Nyayanga, près du lac Victoria, toujours au Kenya. Des outils au processus de fabrication complexe, destinés à produire des éclats à arêtes vives, mais aussi à débiter de la viande et à broyer des végétaux. À leurs côtés, dans la même couche sédimentaire, reposaient deux dents de paranthropes, cousins d'ancêtres d'*Homo sapiens*, parmi 1776 os d'animaux fossilisés. Tous remontent à 2,6 millions d'années au moins, peut-être 3 millions, quand ceux de Lomekwi datent de -3,3 millions d'années (mais, de facture beaucoup plus rudimentaire, ils ne sont pas clairement attribués). La découverte relatée dans *Science* fait ainsi de Nyayanga le plus vieux site associant des outils en pierre avec des marques d'activité sur les os. Elle prouve surtout une fois de plus que *sapiens* est loin d'avoir été le premier hominidé à maîtriser les nouvelles formes de technologie apparues sur notre planète. **M. B.**

UNIVERSITY OF HELSINKI/AFP

L'équitation se pratiquait déjà il y a 5000 ans

BIOANTHROPOLOGIE L'étude de squelettes vieux de 5000 ans de Yamnayas, des éleveurs nomades des steppes eurasiennes, révèle chez certains un « syndrome de l'équitation » visible sur les tibias. C'est la plus ancienne preuve archéologique de l'utilisation du cheval comme moyen de locomotion, 3500 ans avant notre ère, soit dès le tout début de la domestication de l'équidé pour son lait. **R. M.**

SOURCE : MARTIN TRAUTMANN, UNIVERSITÉ D'HELSINKI, FINLANDE.

L'ankylosaure vocalisait comme un oiseau

PALÉONTOLOGIE
La reconstruction 3D d'un rare larynx fossile d'ankylosaure trouvé en Mongolie en 2005 suggère que ces grands herbivores à armure pouvaient vocaliser à la façon des oiseaux. S'ils savaient émettre des sons très puissants, ils possédaient aussi une petite structure similaire au syrinx des oiseaux. **H. J.**

SOURCE : JUNKI YOSHIDA, MUSÉE DE L'UNIVERSITÉ D'HOKKAIDO, JAPON.

Les premiers archers d'Europe

PALÉOANTHROPOLOGIE
Une étude démontre que les 200 pointes de flèches découvertes dans la grotte Mandrin (Drôme), âgées de 54 000 ans, servaient bien aux *H. sapiens* à tirer à l'arc ; un avantage probable sur les néandertaliens. C'est la première preuve d'utilisation de cette arme hors d'Afrique. **R. M.**

SOURCE : L. METZ, UNIVERSITÉ D'AIX-MARSEILLE, FRANCE.

LAURE METZ/LUDOVIC SLIMAK

Cette minuscule pointe date d'il y a 54 000 ans.

11 000 ans
L'âge de la domestication de la vigne

AGRONOMIE L'analyse génétique de 3300 variétés de vigne domestique *(vitis vinifera)* et sauvage *(vitis sylvestris)* montre que le raisin a été domestiqué 3000 ans plus tôt qu'on ne le pensait. Outre son berceau connu dans le Caucase, une autre région a été identifiée dans le Croissant fertile. **L. C.**

SOURCE : YANG DONG, YNAU, CHINE.

La conservation inexpliquée du cœur de Pauline Jaricot

THANATOLOGIE Impossible de savoir comment le cœur de Pauline Jaricot s'est aussi bien conservé. Extrait en 2022 après avoir été placé 161 ans dans un reliquaire, l'organe de la religieuse lyonnaise béatifiée (1799-1862) a été confié à des experts pour des examens complets. Il s'est révélé parfaitement momifié, sans la moindre trace d'embaumement ou d'une autre technique de conservation. **E. T.**

SOURCE : V. BOURDIN, MUSÉE DU QUAI-BRANLY-JACQUES-CHIRAC, FRANCE.

V. BOURDIN ET AL.

L'organe de la religieuse béatifiée (à gauche) était conservé dans son reliquaire.

Les lettres secrètes de la reine Marie Stuart déchiffrées

CRYPTOLOGIE Écrites entre 1578 et 1584 pendant son emprisonnement en Angleterre, 55 missives secrètes de la reine d'Écosse Marie Stuart, oubliées dans les archives de la Bibliothèque nationale de France, ont été déchiffrées par des cryptologues amateurs dans *Cryptologia*. Elles révèlent les intentions d'une *« femme politique avisée »*, notamment ses négociations pour être libérée. Sans succès : elle sera mise à mort en 1584, après dix-neuf ans de détention. **H. J.**

SOURCE : GEORGE LASRY, NORBERT BIERMANN, SATOSHI TOMOKIYO.

Léonard de Vinci a subodoré la relativité

HISTOIRE DES SCIENCES En se penchant sur les expériences décrites dans le *Codex Arundel* de Léonard de Vinci (1452-1519), une équipe a trouvé l'expression *« Equatione di Moti »*, soit « équivalence des mouvements ». Sur le carnet, l'expérience consiste à déplacer un bocal à l'horizontal et à regarder la trajectoire du sable qui s'en déverse. L'équivalence perçue ici est celle entre l'accélération horizontale du bocal et la chute verticale du sable : il identifie accélération et gravité, à la base de la physique moderne. **H. J.**

SOURCE : MORTEZA GHARIB, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ÉTATS-UNIS.

AKG IMAGES - CALTECH

Le génie italien a rapporté une expérience visionnaire dans le « Codex Arundel » (480 à 1518).

AFP - JOE-LUIS OLIVARES, ISTOCK / MIT - CARL KNOX / NATURE PUBLISHING GROUP / AFP - JESSE PLOTKIN/JOHNS HOPKINS UNIVERSI

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

GÉNÉTIQUE

La taille humaine n'a plus de secret

Pour la première fois, une étude a permis de déterminer la totalité des variants communs d'ADN responsables de la taille chez l'humain. Compilant les données de plus de 5 millions de personnes, cette analyse marque la fin d'un travail commencé il y a vingt ans. À lire sur le site de *La Recherche*. http://bit.ly/3YH03Ck

HIGH-TECH

« Il faut former plus de gens à l'IA »

Parce que les besoins de formation sont gigantesques en France, Isabelle Ryl, à la tête de l'institut Prairie, a fait appel à des chercheurs de pointe pour former ingénieurs et cadres dont les métiers sont bouleversés par les progrès de l'intelligence artificielle. Entretien. sciav.fr/914formia

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Partager sur les réseaux brouille le vrai et le faux

Une équipe du MIT montre que la simple intention de partager un contenu en ligne entrave la capacité des internautes à juger si une information est vraie.
sciav.fr/914reseau

5 minutes

Les trous noirs et le secret de l'énergie noire

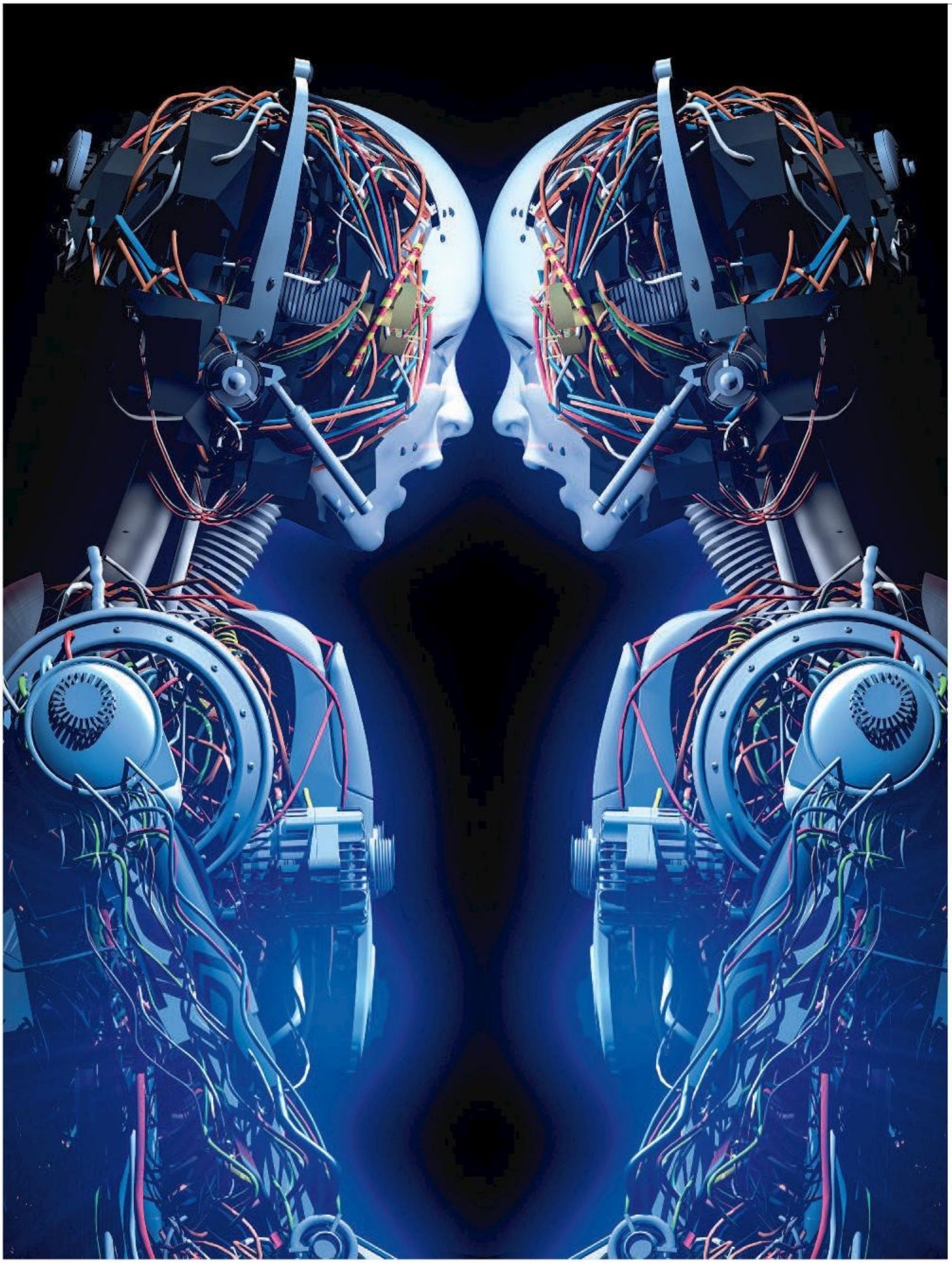
Enquête cosmologique sur l'hypothèse récente selon laquelle les trous noirs seraient remplis de cette substance énigmatique qui accélère l'expansion de l'Univers.
sciav.fr/914noir

10 minutes

Des neurones vivants dans les ordinateurs

Pour multiplier la puissance de l'IA, des scientifiques espèrent la coupler à des organoïdes cérébraux, petites structures cellulaires reproduisant l'activité neuronale.
sciav.fr/914organia

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook



GETTYIMAGES

IA consciente

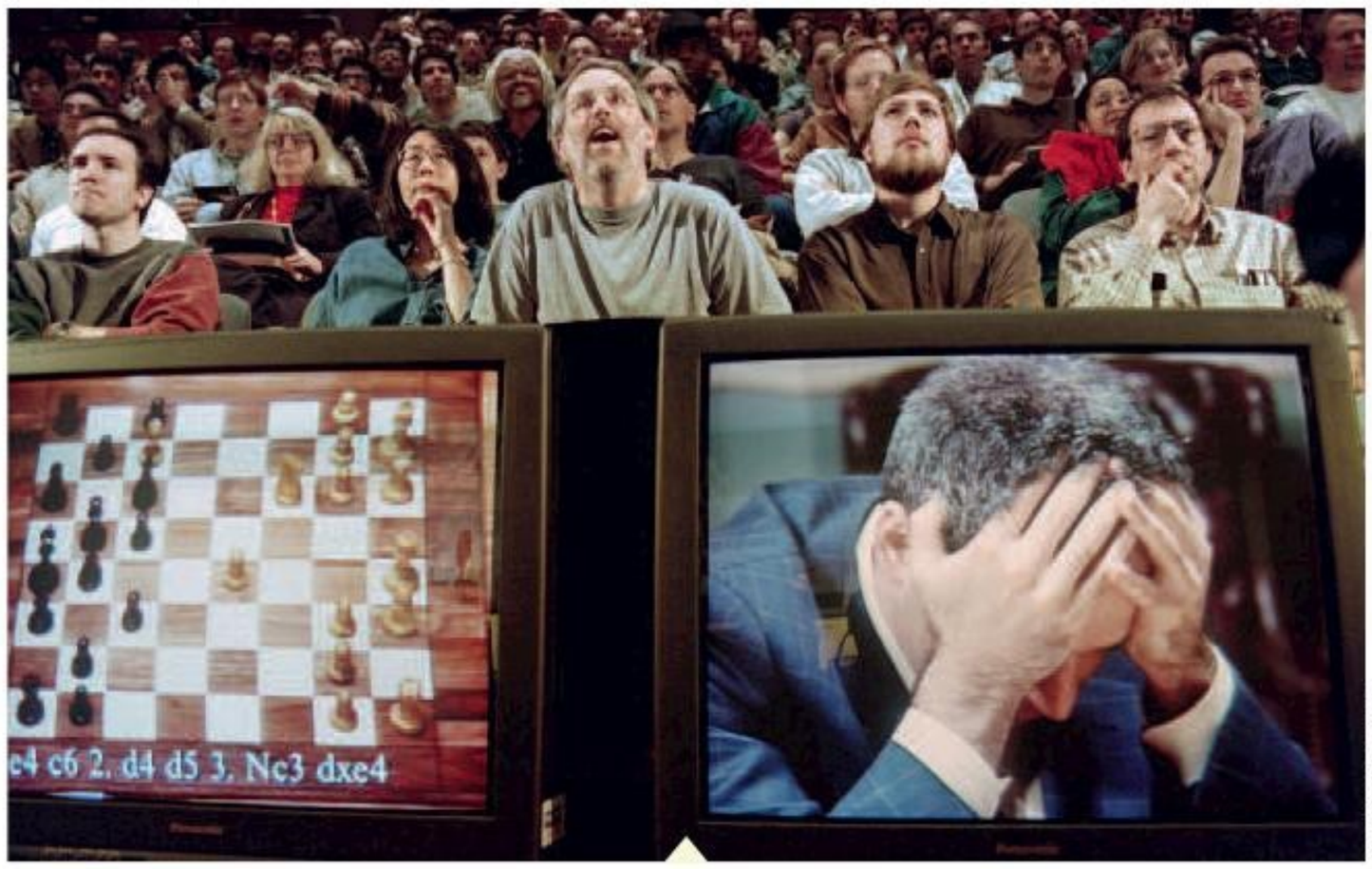
Le retour d'un fantasme

Depuis la fin 2022, les performances en langage naturel de l'agent conversationnel ChatGPT font sensation sur Internet. Il n'en fallait pas plus pour réactiver les débats sur les possibilités qu'une intelligence artificielle se rapproche des aptitudes humaines à comprendre et à ressentir. Décryptage.

Par Arnaud Devillard

Près de 100 millions d'utilisateurs en deux mois ! Dans la courte histoire d'Internet, ChatGPT fait voler en éclats tous les records d'adoption d'un nouveau service (TikTok avait atteint ce seuil en neuf mois, Instagram en plus de deux ans). Depuis sa mise en ligne en novembre 2022, cet agent conversationnel (*chatbot*) ne cesse de fasciner. Il a été conçu par la société OpenAI, dont *Sciences et Avenir* évoquait la création, entre autres par un certain Elon Musk, dès 2016 : *« Un organisme au soutien de projets d'intelligences artificielles "amicales" »*, écrivions-nous alors *(lire n° 838)*. Aujourd'hui, ChatGPT manifeste une aisance langagière inédite. On en viendrait presque à se demander s'il comprend bel et bien ce qu'il dit et ce qu'on lui dit… La question est loin d'être de pure forme. En août 2022, le Center for Data Science de l'université de New York (États-Unis) a publié les résultats d'un sondage effectué auprès de 327 experts en traitement du langage naturel, dans le contexte de l'apparition des grands modèles de langage et des intelligences artificielles (IA) génératives capables de traiter un volume gigantesque de données, tel GPT-3 à la base de ChatGPT. Surprise : pour 51 % d'entre eux, une IA pourrait un jour être douée d'une vraie compréhension. Et 67 % estiment que cela pourra être réalisable en l'exposant à d'autres types de données (comme des images) complétant le texte. Ce n'est pas tout : à 57 %, ces spécialistes voient les progrès actuels comme « un pas significatif vers le développement d'une IA générale ». ▶

C'est-à-dire une IA équivalente à l'intelligence humaine.
De là à l'imaginer dotée d'une conscience d'elle-même, il n'y a qu'un pas… qu'un ingénieur de Google, Blake Lemoine, a allègrement franchi ! En juin 2022, alors qu'il travaillait sur LaMDA, la technologie maison de *chatbot*, il a affirmé qu'elle avait montré sa capacité à ressentir et pouvait prétendre au statut de vraie personne. À l'appui de ses dires, il a publié de larges extraits de ses échanges avec LaMDA… avant d'être licencié. Pour Google, l'ingénieur a outrepassé les précautions de rigueur, en même temps qu'il a enfreint la politique de confidentialité de la société.



STAN HONDA/AFP

Garry Kasparov, champion du monde d'échecs en titre, est battu le 11 mai 1997 par l'ordinateur Deep Blue d'IBM. C'est la première fois qu'une IA bat un humain à ce jeu.

Difficile de définir ce qu'est la conscience

En réalité, la question d'une conscience de la machine est aussi ancienne que la conception des algorithmes. Le mathématicien britannique Alan Turing en 1950 et les fondateurs de l'intelligence artificielle comme discipline de recherche en 1956 envisageaient déjà que la machine devienne un jour l'égal de l'humain. Et depuis 2012, les réseaux de neurones et l'intelligence artificielle dite statistique (le *deep learning*), qui apprennent à partir de données pour accomplir une tâche, font des merveilles. Mais des outils aussi fascinants que ChatGPT ou les générateurs d'images à partir d'instructions textuelles comme Dall-E 2, d'Open AI également, ou Midjourney *(voir* S. et A. *n° 909, novembre 2022),* marquent un nouveau cap. « *C'est encore accentué par le fait que ces applications sont liées au langage,* souligne Sébastien Konieczny, directeur de recherche au Centre de recherche en informatique de Lens (université d'Artois, CNRS). *Auparavant, quand une machine arrivait à résoudre un problème de raisonnement ou battait un champion d'échecs ou de go, c'était impressionnant mais cela s'arrêtait là. Cette fois, la machine parle : on peut très vite fantasmer.* »
Or, ces progrès agissent surtout comme un leurre. D'abord, parce qu'il est difficile de définir ce qu'est la conscience. « *Les spécialistes de neurosciences sont extrêmement prudents dans l'utilisation de ce terme. Ils travaillent sur les circuits neuronaux, les différentes fonctions du cerveau, le système nerveux, mais on voit très peu de publications sur le concept de conscience. Et sur le plan philosophique, c'est tout aussi flou* », remarque Raja Chatila, chercheur à l'Institut des systèmes intelligents et de robotique (CNRS, Sorbonne Université, Inserm).

Un outil fondé sur le modèle statistique

Dans son acception la plus simple, la conscience d'une IA combinerait l'aptitude de cette dernière à se situer dans le temps et l'espace, à comprendre ce qu'elle fait et ce qu'elle dit et à en évaluer les conséquences. « *Même ces choses-là, nous ne parvenons pas à construire des systèmes qui les réalisent de manière satisfaisante* », prévient Jean-Paul Delahaye, du Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille. À l'université Columbia de New York (États-Unis), les chercheurs du Creative Machines Lab estiment néanmoins pouvoir simuler une sorte de conscience en l'associant à la notion de corps, en l'occurrence celui de robots. Ils travaillent sur la perception que des machines matérielles — et pas seulement logicielles — peuvent avoir de leur propre morphologie dans l'espace *(lire l'en-*

LIMITES

En 1966 déjà, l'effet Eliza

La propension à prêter conscience et ressenti à une IA porte un nom : l'effet Eliza. Conçu en 1966 par Joseph Weizenbaum, chercheur en informatique au Massachusetts Institute of Technology (États-Unis), Eliza était un agent conversationnel en langage naturel simulant un psychothérapeute rogérien : une méthode qui consiste à répéter, sous forme de questions, ce que vient de dire un patient pour l'amener à préciser ses propos. Surpris de voir que des utilisateurs croyaient vraiment parler à un interlocuteur doué d'empathie, Joseph Weizenbaum publiera dix ans plus tard *Computer Power and Human Reason* pour tempérer les fantasmes et insister sur les limites de l'IA.

APPRENTISSAGE

ChatGPT : comment l'IA parvient à s'exprimer

Si ChatGPT (acronyme de *generative pretraining transformer*) donne de façon extraordinaire l'impression de savoir s'exprimer, il ne fait qu'aligner des suites de mots qui sont statistiquement les plus probables, sans intégrer la moindre dimension de leur sens. Son algorithme a été entraîné sur une base de données de 8 millions de pages Web constituée par OpenAI, WebText (articles, sites Web, discussions de forums…). OpenAI s'est également servi de romans et d'autres écrits (non divulgués) comme données d'entraînement. Cet ensemble permet à ChatGPT de maîtriser de nombreux styles : rimes, CV, fiche pratique, description, dialogue… Pour limiter la production de contenus erronés lors des interactions, ChatGPT a suivi un apprentissage par renforcement où une intervention humaine indique à une IA si elle se trompe. L'outil est également une variante d'un modèle appelé Transformeur qui lui permet de contextualiser chaque mot d'une phrase avec les autres mots, en donnant un score d'importance à chaque paire de mots. C'est la grande force de ChatGPT : il peut remonter le fil des échanges avec l'utilisateur et s'en servir pour générer ses prochaines interactions. Le tout est combiné à une fonction générative par laquelle le *chatbot* développe cette faculté d'expression qui captive tout le monde. Il répond, confirme, infirme, argumente, rebondit. Même s'il se trompe ou dit n'importe quoi. C'est l'un des problèmes : la puissance de l'outil réside moins dans ce qu'il dit que dans la manière dont il le dit. Il n'est pas conçu pour vérifier ses propos, ni pour éviter le plagiat (il peut recycler des bouts de textes existants). Une couche de filtrage peut lui éviter d'être ouvertement raciste ou insultant, mais dans ce cas, ce ne sera pas le fait du réseau lui-même, mais d'une intervention humaine pour pondérer *a priori* ses propos.

cadré p. 32). Mais cette approche reste encore réductrice.

L'histoire de l'IA montre que les prévisions accompagnant chaque progrès scientifique ont rarement été corroborées par les faits. Ce qui tend à prouver que le fonctionnement du cerveau humain et ce qu'est l'intelligence humaine sont encore mal compris. Difficile dans ces conditions de pouvoir les simuler parfaitement par informatique. « *Concernant l'IA,* poursuit Jean-Paul Delahaye, *nous n'avons pas imaginé à quel point certaines choses étaient difficiles, en particulier faire des machines dotées d'une sorte de conscience ou même faire des robots capables de conduire correctement une voiture. À l'inverse, nous n'avions pas imaginé que des robots traduiraient à peu près correctement certains morceaux de textes, joueraient aux échecs et battraient des champions du monde.* »

Mais l'écueil principal à l'avènement d'une IA consciente est paradoxalement lié aux progrès fulgurants réalisés depuis dix ans avec l'approche statistique des réseaux de neurones. Les résultats sont tels que ces méthodes ont fini par mobiliser un très grand nombre de chercheurs (et de financements) et par devenir, à tort, quasi synonymes d'intelligence artificielle. « *Les réseaux de neurones sont très bons pour faire de la perception, de l'interprétation d'images, de textes, éventuellement de la génération de contenus. En la matière, ce sont des outils dont on ne peut pas se passer,* résume Sébastien Konieczny. *Ils apprennent et aboutissent à un résultat, mais globalement on ne sait pas expliquer pourquoi.* »

Outre le développement d'algorithmes spécifiques, l'essor de ces méthodes est étroitement lié à Internet et à la profusion des données qu'on y trouve. C'est ce qui permet de constituer d'énormes bases d'images, de sons, de textes pour entraîner les algorithmes. « *Ils sont programmés pour chercher des corrélations,* explique Raja Chatila. *Cela va aboutir à ce qu'on appelle des prédictions. Quand une nouvelle donnée arrive, elle est interprétée compte tenu de la corrélation construite par le modèle : l'algorithme va reconnaître un verre parce que l'objet ressemble aux images de verres déjà vues. Mais il ne sait pas ce qu'est un verre.* »

PATRICK KONIECZNY

« Cette fois, la machine parle : on peut dès lors très vite fantasmer »

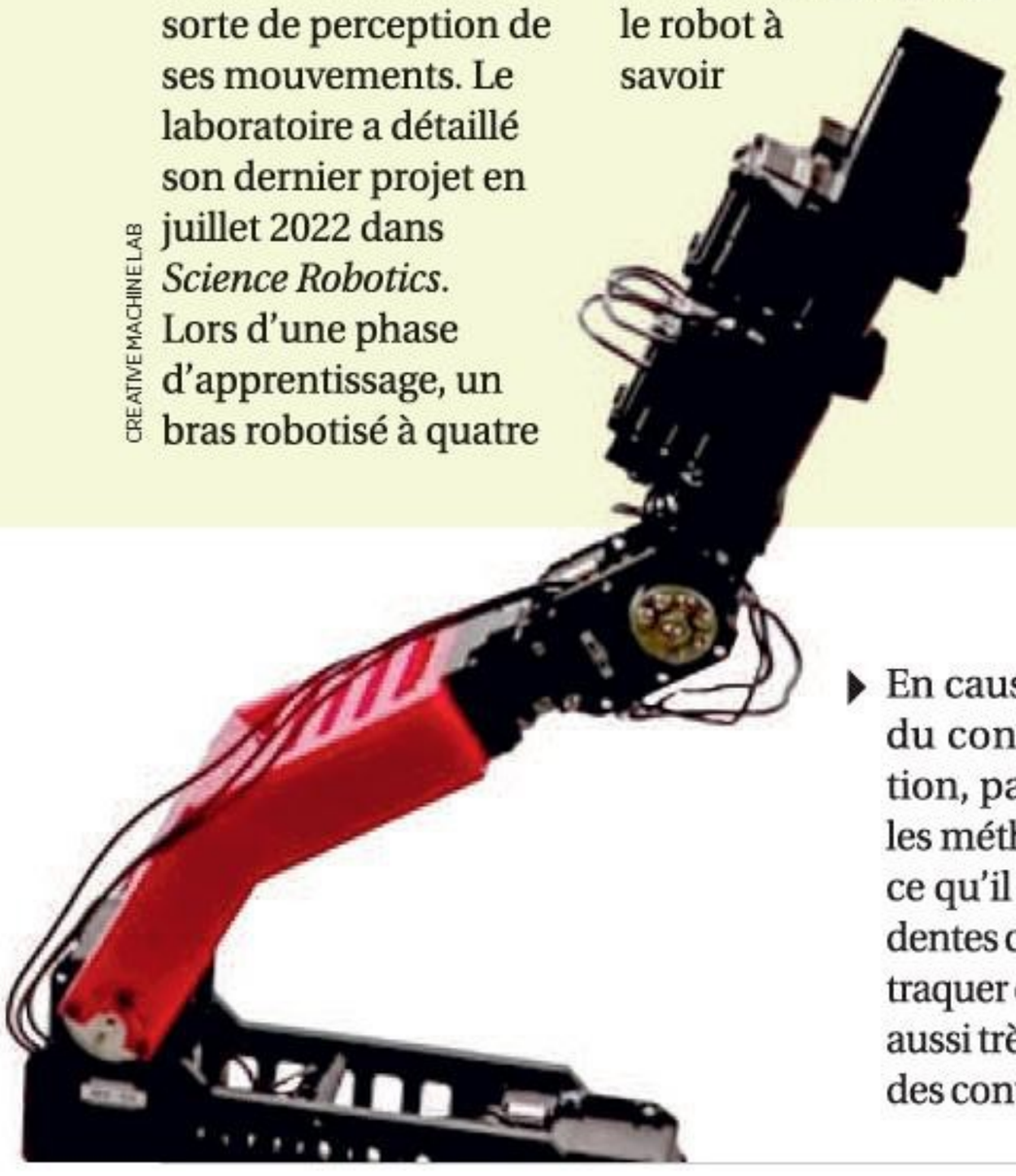
Sébastien Konieczny, directeur de recherche au Centre de recherche en informatique de Lens (Pas-de-Calais)

PROPRIOCEPTION

Des robots pilotés par « automodélisation »

Le bras robotisé attrape des billes pour les déposer dans un verre grâce à la perception qu'il a de sa propre morphologie.

Un robot qui a l'image de lui-même : à la croisée de l'informatique, des sciences physiques et de la biologie, le Creative Machines Lab de l'université Columbia (États-Unis) développe le concept d'automodélisation. Le principe consiste à donner à un robot une sorte de perception de ses mouvements. Le laboratoire a détaillé son dernier projet en juillet 2022 dans *Science Robotics*. Lors d'une phase d'apprentissage, un bras robotisé à quatre degrés de liberté s'agite au hasard en tous sens pendant quelques secondes, filmé sous cinq angles différents. À chaque posture sont enregistrés les angles de chaque articulation et une modélisation 3D en nuage de points de la machine. Le tout constitue une base de données qui entraîne le robot à savoir comment va se traduire dans l'espace tel mouvement d'articulation. Sans capteur, il parvient à obtenir une image entière de lui-même avant de se mouvoir, en une simulation de proprioception. Lors des tests, la machine a réussi non seulement à réaliser les tâches visées, mais aussi à le faire en évitant un obstacle. Pour l'équipe, ce dispositif est *« similaire à la faculté naturelle de l'humain à "voir dans sa propre tête" si son corps passe dans un espace étroit »*.



CREATIVE MACHINE LAB

▸ En cause : la difficulté à tenir compte du contexte. En matière de traduction, par exemple, un outil fondé sur les méthodes statistiques ne vérifie pas ce qu'il a traduit dans les pages précédentes comme le ferait un humain, pour traquer d'éventuelles incohérences. Il est aussi très difficile d'intégrer des règles et des contraintes à un modèle statistique, là où un humain parle et agit selon des normes sociales et légales. D'où des péripéties retentissantes comme celle du *chatbot* Tay, de Microsoft, sur Twitter en 2016. En discutant avec lui, les internautes avaient réussi, à dessein, à lui faire tenir des propos racistes et sexistes. Mi-novembre 2022, c'est l'outil Galactica de Meta qui était pris en défaut. Des chercheurs ont pu lui faire créer des textes vantant les bienfaits de manger du verre pilé ou les avantages de l'antisémitisme. Ces applications ne savent pas, littéralement, ce qu'elles disent.

Simuler un raisonnement grâce à l'approche symbolique

C'est pourquoi certains chercheurs insistent sur l'intérêt d'intensifier les travaux en utilisant une autre approche : l'intelligence artificielle dite symbolique. Dans les laboratoires, elle était même l'approche dominante avant les succès de l'apprentissage profond. *« L'IA symbolique fonctionne selon des descriptions et des règles écrites bien précises que le programmeur comprend »*, note Jean-Paul Delahaye. Le code même permet de savoir pourquoi une IA a dit ou fait une chose, pourquoi elle a raison ou elle se trompe. Ce qui revient à simuler un raisonnement. Les voitures autonomes sont loin de fonctionner uniquement avec du *deep learning*. Leur système embarque des règles de simulation physique ou le code de la route, qui relèvent de l'IA symbolique. Cette approche serait-elle plus à même de simuler une conscience des machines ? La clef, si elle existe, se trouve probablement dans une hybridation symbolique-statistique. En attendant d'y parvenir, demeure une question : qu'apporterait une IA consciente ? *« Le but de l'IA est surtout de fournir des programmes utiles,* estime Sébastien Konieczny. *Si un* chatbot *génère du texte de manière naturelle, on peut imaginer de l'intégrer à un robot compagnon, et ce sera plus agréable et plus utile pour l'interaction que de converser avec Siri. Qu'il soit vraiment conscient, c'est plutôt une question philosophique. »* ■

BENOÎT GROSSIN - RADIO FRANCE / MAXPPP

Une des huit baies hautes du chœur de la cathédrale de Paris, en cours de nettoyage dans une manufacture, trois ans après l'incendie de 2019.

La couleur des vitraux éclairée par la physique

En utilisant des instruments de pointe, des équipes pluridisciplinaires parviennent à déterminer la composition chimique des vitraux tels ceux de Notre-Dame. Leur but : percer le secret de fabrication et l'origine des couleurs utilisées par les maîtres verriers du Moyen Âge et leurs successeurs.

Les vitraux de la cathédrale Notre-Dame de Paris sont de vrais miraculés. Lors de l'incendie qui a ravagé sa charpente, sa flèche et les toitures de sa nef en 2019, les 120 verrières mises en place entre le XIIIe et le XXe siècle ont été intégralement préservées. « *La voûte les a protégées de la chaleur extrême. Et les pompiers ont réussi à intervenir sans les arroser, empêchant un choc thermique qui les aurait fait exploser* », se réjouit Claudine Loisel, responsable du pôle vitrail au Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH). Après le sinistre, 25 verrières conçues au XIXe siècle sous l'autorité d'Eugène Viollet-le-Duc ont été cependant extraites de leur armature en métal. Objectif ? Caractériser les particules riches en plomb produites par le brasier et qui se sont déposées en surface afin de mener à bien leur restauration. Mais profiter aussi de cette opportunité pour renouveler les connaissances sur ces œuvres. « *Les techniques de fabrication comme les mécanismes physico-chimiques engendrent de fascinantes palettes de couleurs* », pré-

cise Claudine Loisel, qui coordonne les recherches. Depuis décembre 2022, une vingtaine de physiciens, chimistes, historiens et experts dans la conservation du patrimoine examinent ainsi ces vitraux avec des instruments de pointe, comme le synchrotron Soleil situé à Saint-Aubin (Essonne) ou l'accélérateur de particules New Aglaé du Centre de recherche et de restauration des musées de France, niché dans les sous-sols du Louvre. « *Et cette enquête pluridisciplinaire n'est pas un cas isolé,* observe l'historien Michel Hérold du centre André-Chastel (CNRS, Sorbonne Université). *Depuis une dizaine d'années, de tels consortiums se multiplient pour percer les secrets de ces matériaux aux couleurs flamboyantes, ouvrant une nouvelle ère de connaissance de l'art du vitrail.* »

Avec une surface totale d'environ 55000 m² pour les œuvres antérieures à la Révolution, la France abrite davantage de vitraux que le reste de l'Europe. Les fouilles archéologiques indiquent qu'ils ont été utilisés dès l'époque mérovingienne, entre le Ve et le VIIIe siècle. Mais la plus ancienne verrière encore en place date d'environ 1120 : celle de la cathédrale du Mans représentant l'Ascension de Jésus. « *Les fenêtres vitrées sont les écritures divines qui versent la clarté du vrai soleil, c'est-à-dire de Dieu dans l'église, c'est-à-dire dans le cœur des fidèles, tout en les illuminant* », expliquait l'évêque de Mende à la fin du XIIIe siècle.

Un mélange de sable et de cendres végétales

Pour représenter des scènes de la Bible chrétienne, les maîtres verriers assemblaient ainsi des pièces de verres colorés avec des baguettes de plomb. Une peinture appelée « grisaille » était en outre appliquée pour dessiner des ombres ou souligner les traits des visages. Les verres étaient fabriqués en faisant fondre un mélange de sable, source de silice, et de cendres végétales (chêne, hêtre, fougères, etc.). Riches en ions alcalins (potassium, sodium) et alcalino-terreux (calcium, magnésium), celles-ci abaissaient la température de fusion de la silice de 1730 °C à une gamme comprise entre 1200 °C et 1100 °C, compatible avec les fours de l'époque. Elles permettaient d'obtenir aussi la viscosité adéquate pour le soufflage et la mise en forme des verres.

Jusqu'au début du XIVe siècle et l'invention d'une peinture dénommée « jaune d'argent » *(lire l'encadré ci-contre)*, les vitraux étaient colorés exclusivement dans la masse. Leurs couleurs résultaient de l'ajout d'oxydes métalliques dans le verre en fusion — des métaux dits de transition en particulier, comme le fer, le cuivre, le cobalt ou le nickel, qui absorbent certaines longueurs d'onde de la lumière visible. « *Celles qui ne sont pas piégées et traversent le verre correspondent ainsi à la couleur que l'on observe* », indique Myrtille Hunault, chercheuse en sciences des matériaux rattachée au synchrotron Soleil. En captant les longueurs d'onde spécifiques au rouge, les oxydes de fer génèrent par exemple une coloration verte. Dans le détail, la nature, la force et les tonalités d'une couleur dépendent toutefois de nombreux autres paramètres, comme la quantité, la taille ou le degré d'oxydation des particules métalliques. « *Le nombre et le type d'atomes avec lesquels ces particules se combinent au sein du réseau vitreux jouent également un rôle majeur,* relève Myrtille Hunault. *Pour comprendre l'origine d'une couleur, il est donc essentiel de caractériser cet environnement chimique.* »

LRMH

Une pièce de verre d'un vitrail (au centre) est étudiée au synchrotron Soleil, un des instruments de pointe utilisés pour percer les secrets des matériaux.

Les recettes des couleurs et leur origine ont pu être établies

Les premières études scientifiques de grande ampleur sur la couleur des vitraux ont été menées en 2015 par des chercheurs du centre André-Chastel, du LRMH et de l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie à Sorbonne Université. Ils ont profité d'une campagne de restauration des vitraux de la Sainte-Chapelle de Paris pour les examiner avec la gamme complète des techniques d'analyse non destructives. Grâce à un spectromètre de fluorescence des rayons X

PROCÉDÉS

Le mystère de la couleur jaune

Deux techniques étaient utilisées pour colorer en jaune les vitraux anciens. Inventée vers 1310, l'une d'elles consistait à appliquer une peinture composée d'ocre et de sels d'argent, cuite sur le verre à 630 °C. Les ions d'argent migraient alors dans les couches superficielles du matériau pour former d'infimes particules. Elles donnaient à celui-ci une coloration jaune soutenue, réhaussant les dessins de bijoux et de couronnes ou la chevelure des anges. Apparue avant le XIIe siècle, l'autre technique produisait un jaune moins éclatant en incorporant des éléments métalliques dans le verre en fusion. « *On suppose que la recette comprenait une association de soufre et de fer. Mais celle-ci est très mal connue faute de sources historiques* », explique l'ingénieure de recherche Claudine Loisel. Une thèse de doctorat menée à l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmologie vise depuis 2021 à en percer les mystères.

LRMH - ANGÈLE DEQUIER, 2022.

Un vitrail de Notre-Dame analysé par l'accélérateur New Aglaé.

et aux faisceaux de protons d'Aglaé, leur composition a été déterminée avec une précision de quelques parties par million. Et c'est avec un spectromètre d'absorption optique combiné à des outils de calculs numériques que l'environnement des éléments métalliques a pu être finement caractérisé. Les recherches ont porté à la fois sur les vitraux de la nef, datant du XIIIe siècle, et ceux de la rose occidentale construits au XIVe siècle sous le règne de Charles III. « *Consacrés au thème de l'Apocalypse, ces derniers sont l'un des grands chefs-d'œuvre de l'art de la fin du Moyen Âge,* souligne Michel Hérold. *Recourir aux sciences des matériaux a été pour l'équipe un moyen de partir à la recherche du lieu et des modes de fabrication de verres exceptionnels.* » Les résultats ont donné lieu à une série de publications entre 2015 et 2022. Ils ont permis de préciser, notamment, la « recette » et l'origine des couleurs. Le bleu résulte ainsi d'ions cobalt combinés à de petites quantités d'oxydes de fer. Quant au rouge, il est généré par d'infimes particules de cuivre… d'une vingtaine de nanomètres seulement! L'étude est également riche d'enseignements sur l'évolution de l'art du vitrail. Alors qu'une demi-douzaine de teintes étaient utilisées au XIIIe siècle, « *la palette a plus que doublé deux siècles plus tard grâce à l'invention de nouvelles couleurs comme le violet, produit par une association d'ions cobalt et de manganèse, ainsi que la technique du plaquage* », signale Myrtille Hunault. Cette technique consiste à superposer, lors du soufflage, deux voire trois couches de verres de quelques millimètres d'épaisseur, colorés ou non. « *Nous savions qu'elle était exploitée, depuis le XIIe siècle, pour obtenir les verres rouges,* note Claudine Loisel. *Mais nous avons été très surpris de constater qu'elle s'emploie quasiment pour toutes les couleurs et plus de la moitié des vitraux de la rose.* »

Les résultats sur Notre-Dame seront dévoilés en 2024

Pour Michel Hérold, ces travaux ont constitué « *un moment décisif* », une preuve de concept incitant des études similaires (en 2020 par exemple, pour les verrières de la cathédrale Sainte-Marie d'Auch dans le Gers, datant du XVIe siècle). Et c'est avec cette même approche pluridisciplinaire qu'un aréopage de scientifiques ausculte actuellement les vitraux de Notre-Dame déposés à la suite de l'incendie. Ils ont été conçus par le peintre-verrier Laurent-Charles Maréchal dans les années 1860. La documentation historique est cependant lacunaire, tant pour la provenance des verres que les techniques de coloration. « *Or, cette période est particulièrement intéressante,* note Claudine Loisel. *Car après une ère de déclin et de perte de savoir-faire au XVIIIe siècle, l'art du vitrail a été redécouvert au milieu du XIXe siècle en donnant même lieu à de nombreuses innovations.* » Les résultats des analyses seront dévoilés dans un an. ■

Franck Daninos @fdaninos

SYNCHROTRON SOLEIL

« Le nombre et le type d'atomes avec lesquels les particules de métal se combinent au sein du vitrail jouent un rôle majeur »

Myrtille Hunault, chercheuse en sciences des matériaux rattachée au synchrotron Soleil

Des super-Terres fabriquées à la chaîne

Grâce à une modélisation numérique, des astrophysiciens sont parvenus à décrire la formation des super-Terres, des exoplanètes très courantes dans la galaxie, et pourtant absentes de notre système solaire.

Existe-t-il un point commun entre les exoplanètes de type super-Terre et des petits pois ? Deux astrophysiciens, au moins, connaissent la réponse à cette devinette : Alessandro Morbidelli (observatoire de la Côte-d'Azur/CNRS) et Konstantin Batygin (California Institute of Technology, États-Unis). Dans un article publié dans la revue *Nature Astronomy* du 12 janvier, ils présentent un modèle de formation des super-Terres capable d'expliquer leurs caractéristiques, y compris celle qu'elles partagent avec les petits pois, comme l'explique Alessandro Morbidelli : *« Lorsqu'elles sont présentes dans un système solaire, les super-Terres ont toutes à peu près la même taille. En revanche, celle-ci varie d'un système à l'autre. De la même façon, les petits pois dans une cosse se ressemblent tous, mais ils sont différents d'une cosse à l'autre. »* Tout se passe donc comme si chaque système solaire ne pouvait produire qu'un type de super-Terre. Et ce n'est qu'une des particularités de ces astres remarquables.

Comme leur nom le suggère, les super-Terres ressemblent à la Terre. Mais uniquement parce qu'elles sont rocheuses : pour le reste, elles s'en éloignent grandement. D'abord, leur masse vaut jusqu'à dix fois celle de la Terre. Elles orbitent en général très près de leur étoile (parfois à moins de dix millions de kilomètres, contre 150 millions pour la Terre). Elles possèdent une légère atmosphère primitive d'hydrogène et d'hélium, ou bien sont nues si la proximité de l'étoile a chassé cette atmosphère. Elles se forment très tôt dans leur système solaire, contrairement à nos planètes telluriques apparues après les géantes gazeuses comme Jupiter ou Saturne. Enfin, la catégorie des super-Terres est la plus représentée parmi les quelque 5300 exoplanètes recensées jusqu'ici. Pourtant, notre système n'en contient aucune… Ce dernier point a retenu l'attention des deux astrophysiciens. En janvier 2022, ils avaient proposé un modèle de formation des planètes telluriques dans notre système solaire, toujours dans *Nature Astronomy*, en compagnie d'autres auteurs. Dès lors, ainsi que le résume Alessandro Morbidelli, *« il était important de montrer que notre modèle peut être adapté à d'autres systèmes solaires et expliquer la formation fréquente de super-Terres »*.

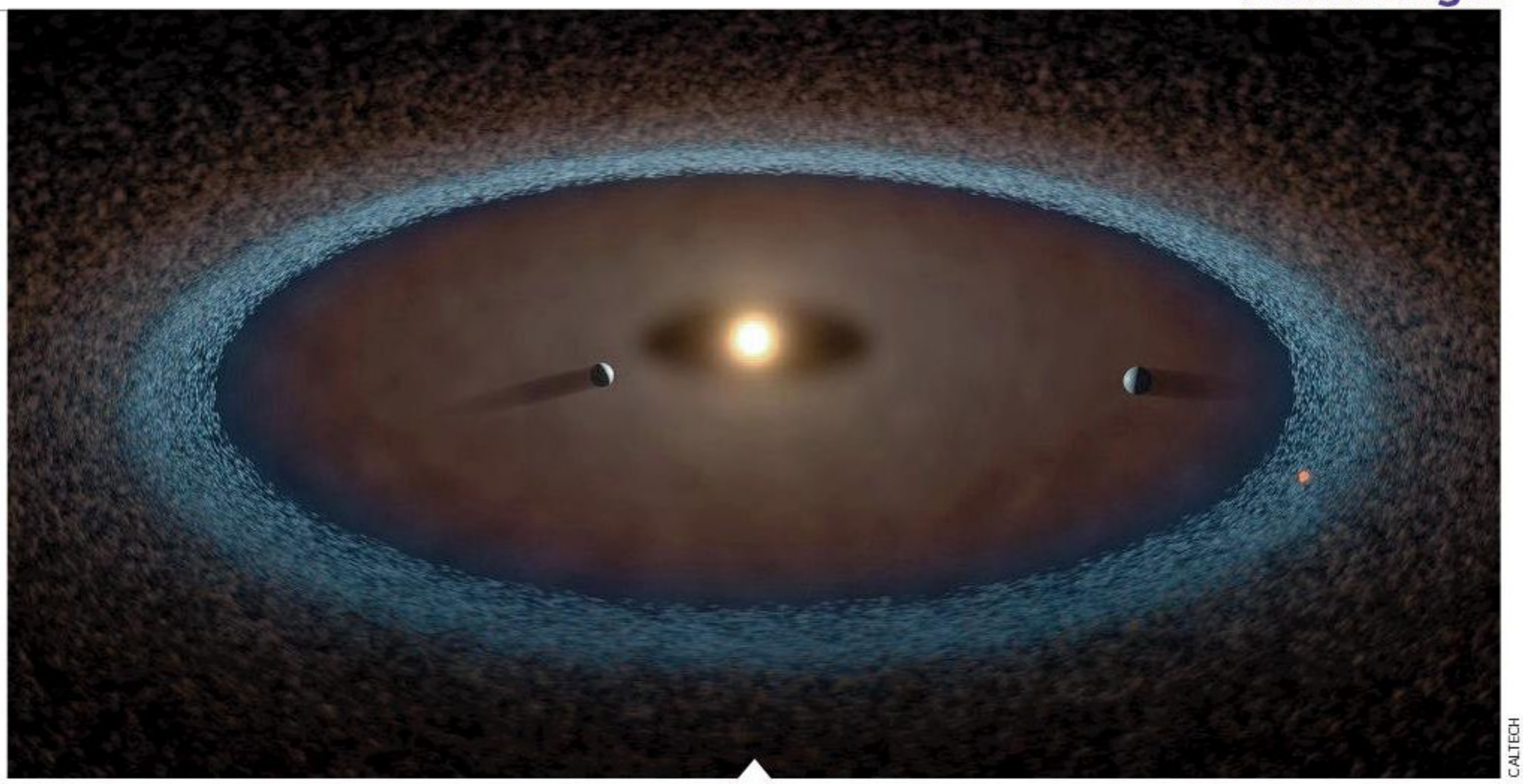
Des planètes formées dans un anneau proche du Soleil

Revenons à la naissance de notre système solaire, telle que l'envisage la publication de janvier 2022. Les planètes se seraient formées dans deux anneaux distincts : l'un proche du Soleil aurait donné les planètes telluriques. L'autre, plus éloigné, aurait accouché des géantes gazeuses, de Jupiter à Neptune. Celui qui nous intéresse est le premier anneau, le

ELSI/TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

« Dans un système solaire, les super-Terres ont toutes à peu près la même taille, mais celle-ci varie d'un système à l'autre »

Alessandro Morbidelli, astrophysicien, directeur de recherche CNRS, observatoire de la Côte-d'Azur



CALTECH

D'après cette simulation, les planètes de type super-Terre se forment dans l'anneau de matière (en bleu) et migrent vers leur étoile. Lorsqu'elles sortent de l'anneau, elles cessent de grossir.

plus proche du Soleil. Il se compose de matière rocheuse et sa masse est d'environ deux fois celle de la Terre. Il s'est formé à environ 150 millions de kilomètres du Soleil, lorsque la température a permis aux silicates de se condenser en poussières, qui ensuite se sont agglomérées pour former des planétésimaux. Au centre de cet anneau, plus dense, les planétésimaux ont à leur tour fusionné par collisions, donnant naissance à la Terre et à Vénus, de masses voisines (la masse de Vénus représente 81 % de celle de la Terre). Puis, sur les bords internes et externes de l'anneau, plus fins et moins denses, se sont formés deux « rogatons » : Mercure (5 % de la masse de la Terre) et Mars (10 %). Maintenant, imaginons que l'anneau soit beaucoup plus massif que deux masses terrestres… *« Nos simulations montrent que le système évolue alors très différemment,* explique Alessandro Morbidelli. *Comme il y a beaucoup plus de matière, les planètes se forment plus rapidement que nos planètes telluriques. Voilà pourquoi elles apparaissent plus tôt dans l'histoire de leur système solaire.* » Mais les simulations montrent aussi autre chose. *« Les planètes grossissent dans l'anneau qui contient du gaz. L'attraction gravitationnelle qu'il exerce sur elles leur fait perdre de l'énergie. Elles se rapprochent de leur étoile à une vitesse directement proportionnelle à leur masse.* » Ainsi, plus la planète grossit, plus elle glisse rapidement vers l'étoile. Sitôt expulsée de l'anneau, elle cesse de croître faute de matière. *« Ce processus se reproduit pour chaque super-Terre. Comme le phénomène dépend des caractéristiques de l'anneau (densité, viscosité, masse initiale, vitesse d'accrétion du gaz…), cela explique pourquoi, au sein d'un même système solaire, toutes les super-Terres se ressemblent. Et qu'elles diffèrent d'un système à l'autre* », précise l'astrophysicien.

En attente de confirmation par l'observation

Mais le modèle d'Alessandro Morbidelli et de Konstantin Batigyn ne s'arrête pas là. Il prédit que les planètes finales, constituées en dernier à partir d'un anneau « épuisé » par la formation des planètes précédentes, seraient significativement plus petites jusqu'à sortir de la catégorie des super-Terres. Et comme il n'y a plus de matière dans l'anneau, elles ne migrent pas. La similitude des tailles, façon « petits pois », ne serait donc valable que pour les planètes les plus proches de l'astre central. Une propriété que les observations ne confirment pas… Tout du moins pas encore. *« Sur cet aspect, il y a un biais observationnel,* constate Alessandro Morbidelli. *Les super-Terres proches de leur étoile sont plus "faciles" à observer, car la probabilité qu'elles passent devant l'astre est plus grande. On détecte ce passage en observant la variation de luminosité de l'étoile, c'est ce que l'on appelle la méthode des transits. Des planètes plus petites, et situées plus loin, sont forcément plus difficiles à voir.* » Plus difficile, mais pas impossible pour les nombreuses missions lancées dans la traque des exoplanètes, notamment l'instrument Tess (Nasa), en orbite depuis 2018 et qui se consacre uniquement à la traque d'exoplanètes par la méthode des transits. Et, à venir, la mission Plato de l'Agence spatiale européenne, prévue pour 2026. La confirmation de ce modèle devra donc attendre ces prochaines observations. ■

Fabrice Nicot @fnicot07

MARCO CAROZZI PARIS-SACLAY UNIVERSITY - INRAE - AGROPARISTECH

L'urine humaine, riche en nutriments (phosphore, azote...) essentiels aux plantes, pourrait satisfaire une part importante des besoins agricoles si elle était recyclée. Cette valorisation implique un changement substantiel des pratiques agricoles et de la gestion des villes.

Engrais

L'avenir de l'agriculture passe par l'urine

L'autorisation de mise sur le marché français du premier engrais à base d'urine humaine donne le feu vert à une industrialisation de cette pratique. Au moins 20 % des engrais chimiques pourraient être économisés en France grâce à une collecte généralisée du liquide organique.

Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

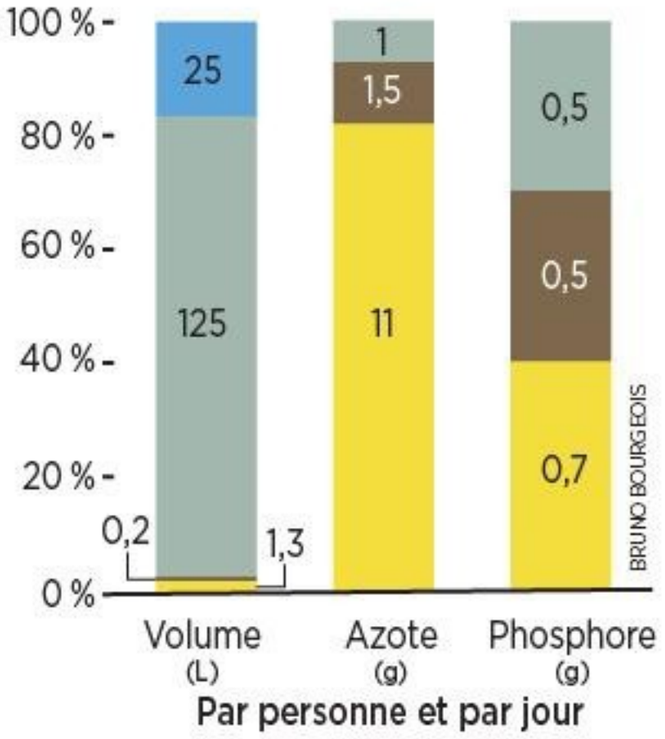
Ce printemps, quelques agriculteurs français vont disperser de l'urine dans leurs champs ! Pour le bien de l'humanité. Car le poids environnemental, économique et sociétal du traitement actuel des excreta humains s'alourdit. Le coût de leur élimination par la chasse d'eau, les égouts, la station d'épuration ne cesse d'augmenter tandis que les rejets en nitrate et en phosphore menacent depuis des décennies l'équilibre écologique des rivières. Aussi, l'autorisation de mise sur le marché français du premier engrais à base d'urine humaine, accordée en octobre 2022 par l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses), fait partie de ces décisions qui paraissent anecdotiques au premier abord, mais engagent en réalité l'avenir d'un pays tout entier tant elle implique de changements majeurs dans la gestion des villes, la mutation de l'agriculture, la lutte contre le changement climatique.

C'est en tout cas la conviction profonde de Michaël Roes, le fondateur de Toopi Organics, la start-up de Loupiac-de-la-Réole (Gironde), que le feu vert de l'Anses va transformer en industriel de l'engrais. À l'origine de la démarche, la conscience profonde du formidable gaspillage d'un nutriment essentiel aux plantes : le phosphore. « *Nos recherches portaient sur les biostimulants à base de végétaux produits à partir de la bactérie* Lactobacillus paracasei, *intéressante pour son effet de stimulation des plantes,* détaille Michael Roes. *Nous nous sommes aperçus qu'associée à l'urine, cette bactérie améliorait l'assimilation du phosphore des sols par les végétaux.* » Le liquide organique est d'abord stabilisé et ▸

« hygiénisé » puis passé dans des biofermenteurs qui assurent la multiplication bactérienne. Les essais menés en plein champ sur des cultures comme le blé ont démontré une croissance robuste des plantules malgré une diminution forte des engrais chimiques. L'Anses, mais aussi cinq autres pays européens qui autorisent également le nouvel engrais, ont été pleinement convaincus.

Toopi Organics pousse en avant une composition originale où l'urine n'est plus seulement un fertilisant, mais aussi un milieu de culture pour des micro-organismes essentiels pour les plantes. La start-up a profité de travaux antérieurs démontrant que le pipi contient l'essentiel de l'azote, du phosphore et du potassium rejetés par les humains *(voir l'infographie ci-contre)*. Ce qui n'a rien d'étonnant. « *Nous restituons sous forme de déchets des minéraux que nous avons ingérés en nous nourrissant de fruits et légumes* », explique Fabien Esculier, coordinateur du programme Ocapi (Organisation des cycles carbone, azote et phosphore dans les territoires), hébergé par le Laboratoire eau, environnement et systèmes urbains (Leesu) de l'École des ponts ParisTech. Dans sa thèse soutenue en 2014, Fabien Esculier explique ainsi que c'est à la sortie de la Seconde Guerre mondiale, après d'âpres débats, que les élus des villes ont décidé de traiter les déchets humains au moyen de la chasse d'eau, permettant d'évacuer rapidement hors des logements et lieux de travail des déchets pouvant générer des risques pour la santé publique.

Composition des eaux usées domestiques



L'urine contient 80 % de l'azote et près de 40 % du phosphore dans 1,3 % des eaux usées domestiques.

20 % des engrais chimiques pourraient être économisés

Dès lors, l'urine et les fèces ont suivi le chemin des égouts et abouti à la station d'épuration. Là, des bactéries oxygénées par l'agitation de l'eau des bassins ont pour tâche d'assimiler la matière organique pour la faire précipiter sous forme de boues. L'eau épurée est restituée à la rivière, les boues sont soit épandues sur les terres agricoles, soit pour une moitié incinérées ou mises en décharge. Les normes européennes imposent des seuils limites de rejet en nitrates et phosphore. En effet, le nitrate sous forme de nitrites peut affecter la santé humaine et le phosphore provoque l'eutrophisation des eaux et la mort des poissons en provoquant une croissance trop forte des végétaux aquatiques. « *Or les stations d'épuration ne récupèrent que 5 % d'un azote qui a nécessité beaucoup de gaz naturel pour le transformer en engrais* », dénonce Fabien Esculier. Dans la revue *Nature* du 10 février 2022, la journaliste et écrivaine Chelsea Wald énumère les recherches sur le sujet en Afrique du Sud, aux États-Unis et en Suède. Selon les données qu'elle a recueillies, 6,2 millions de tonnes de nitrates sont rejetées tous les ans dans les eaux côtières du globe.

Il y a donc une vraie logique à restituer à la terre le plus rapidement possible des

APPROVISIONNEMENT

La guerre en Ukraine a entraîné une pénurie d'engrais de synthèse

Le conflit russo-ukrainien a fait exploser le prix des engrais. Et mis l'accent sur la dépendance de l'agriculture européenne vis-à-vis de fournisseurs extérieurs, au premier rang desquels la Russie. La production d'azote naturel, tout d'abord, nécessite une grande quantité de gaz naturel. La dépense énergétique est telle que le secteur représente 3 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Or, en tant que pays gazier, la Russie a concentré une grande partie des usines d'engrais chimiques.

Les gisements de phosphate, ensuite, sont concentrés sur quelques parties du globe. Là encore, la Russie et la Biélorussie font partie des premiers producteurs. Une guerre sourde oppose d'ailleurs les Russes aux Marocains — qui possèdent 70 % des réserves mondiales. L'Union européenne voudrait en effet faire baisser les teneurs en cadmium — un métal néfaste pour la santé humaine et les sols — dans les engrais phosphatés, ce qui favoriserait… la Russie. Enfin, le marché de la potasse se partage principalement entre le Canada et, une nouvelle fois, la Russie. Il est donc urgent de trouver d'autres sources d'approvisionnement ou d'adopter des alternatives, comme les engrais organiques (lisiers, fumiers) ou… l'urine. Les besoins de l'humanité en azote ont été multipliés par dix depuis les années 1950 et ceux en phosphate et potasse par quatre.

Quatre techniques pour recycler l'urine en fertilisant

minéraux présents dans l'urine. Les jardiniers y sont invités par une manipulation simple qui consiste à la stocker pendant six mois pour qu'elle se transforme en azote ammoniacal. Ce « lisain » est utilisé depuis l'Antiquité. Il est efficace sur de petites surfaces mais il en faudrait 25 000 litres par hectare pour un usage agricole. Aussi, le traitement de Toopi Organics permet de réduire le besoin à 25 litres seulement. Mais ce n'est pas la seule voie. L'urine peut être nitrifiée et concentrée par extraction d'une partie de l'eau présente, ou bien encore alcalinisée par contact avec de la chaux, ce qui permet de produire un granulé concentré, ou enfin mélangée avec des sciures et copeaux de bois pour enrichir un compost *(voir l'infographie ci-dessus)*. Les travaux menés par Ocapi montrent qu'au moins 20 % des engrais chimiques pourraient être économisés en France grâce à une collecte généralisée de l'urine. *« En France, l'engrais humain de nos excrétions représentent environ 300 000 tonnes d'azote par an. Utilisé pour fertiliser du blé, cela serait suffisant pour la production de 200 millions de baguettes de pain tous les jours »*, affirme Fabien Esculier. L'unité mixte de recherche Metis (CNRS, EPHE, Sorbonne Université) a démontré que d'ici à 2050, en associant l'urine avec une reconnexion des productions végétales et animales (la polyculture-élevage), l'introduction systématique de légumineuses dans les assolements et une diminution de la consommation de viande par les populations, le continent européen n'aurait plus besoin d'importer de nourriture tout en réduisant de moitié les pertes de nitrate dans l'environnement.

Certes, mais comment faire pour récupérer tous ces millions de litres d'urine ? Peu de solutions existent aujourd'hui, mais rien n'est impossible. Michaël Roes assure avoir déjà une production annuelle de 250 000 litres. *« Nous avons signé des partenariats avec des lycées, des installations touristiques, des stades, des organisateurs de festivals et un ges-*

FABIEN ESCULIER

« Les stations d'épuration ne récupèrent que 5 % d'un azote qui a nécessité beaucoup de gaz naturel pour le transformer en engrais »

Fabien Esculier, coordinateur du programme Ocapi au Laboratoire eau, environnement et systèmes urbains (Leesu)

tionnaire d'autoroutes pour les aires de repos, énumère le chef d'entreprise. *Toopi Organics procède au remplacement des sanitaires classiques par des urinoirs sans eau masculins et féminins reliés à des cuves de collecte.* » La rémunération se fait par la vente du produit final. Toute la production actuelle est déjà vendue grâce à un importateur à la recherche de solutions de rechange aux engrais minéraux actuels. Le modèle est décentralisé. Pas question de déplacer sur des centaines de kilomètres des camions-citernes pleins d'urine. En 2028, Toopi Organics prévoit une production de 3,75 millions de litres provenant de 20 métropoles françaises et traités sur sept sites.

Un projet d'éco-quartier bientôt expérimenté à Paris

D'ici à la fin de la décennie, il est probable que l'industriel girondin ne soit pas seul à occuper le créneau. Les conseils régionaux, les agences de l'eau, les promoteurs immobiliers commencent à s'y intéresser. D'autant que la plupart des communes font face au redoutable renouvellement des réseaux d'assainissement, qui datent pour les plus anciens des années 1960. En France, l'addition se monte à plusieurs milliards d'euros. Séparer les urines et les fèces des eaux ménagères provenant des machines à laver ou de la salle de bains, peu chargées en polluants et pouvant être recyclées soit pour alimenter les toilettes, soit pour l'irrigation, pourrait soulager la charge des syndicats d'assainissement.

L'heure est donc à l'expérimentation. Les Suédois ont en la matière quelques décennies d'avance. Les premiers « écovillages » utilisant la technique de séparation des urines datent des années 1990. « *Nous avons pu ainsi visiter quelques réalisations pour nous assurer que les systèmes étaient efficaces, réalisables et surtout sans odeur* », raconte Ghislain Mercier, responsable du projet de recyclage des urines pour le futur quartier Saint-Vincent-de-Paul, dans le XIVe arrondissement de Paris. Les 600 logements du projet seront équipés de toilettes séparatives. L'urine sera collectée vers une usine de traitement enterrée de 70 m² située dans le quartier. Elle y sera stabilisée, filtrée et concentrée. 15 litres d'urine produiront 1 litre d'engrais qui sera utilisé sur les espaces verts parisiens. « *Le projet se construit en concertation avec les futurs occupants afin de s'assurer qu'ils acceptent bien cet important changement dans la vie quotidienne* », précise Ghislain Mercier. Ocapi se préoccupe aussi de « l'acceptabilité ». Sur le campus de Paris-Saclay, dans le sud de Paris, les urines des étudiants et professeurs sont récupérées et épandues sur les champs de blé voisins. Le pain qui en est issu revendique d'avoir poussé grâce à cette source locale. Jusqu'ici sans grandes protestations.

NOMIX EAWAG/COURTESY OCAPI

Les toilettes à séparation permettent de collecter sélectivement les déjections liquides et solides.

Les systèmes de collecte se multiplient en France

Peut-on imaginer les habitants des grandes villes arrêter de tirer la chasse ? Certains sautent le pas. À Bordeaux, un système de collecte des urines par vélo-cargo a un temps fonctionné. À Paris, le siège de la fondation Charles-Léopold-Mayer dans le XIe arrondissement fonctionne avec des toilettes sèches par militantisme écologique. Le nouveau siège de l'Agence spatiale européenne dans le XVe possède également des toilettes séparatives, mais il s'agit là d'une vitrine des technologies employées pour traiter les effluents humains dans l'espace. L'agence de l'eau Seine-Normandie a inclus la collecte de l'urine dans son programme d'aide aux collectivités locales. Le développement du compostage urbain devrait d'ailleurs inciter les plus volontaires à opter pour cette solution qui n'est pas interdite mais impose la présence d'un composteur. Bientôt les engrais naturels de l'urine des villes retourneront aux champs. ■

CONTAMINATION

Des résidus de médicaments à surveiller

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime que le stockage seul de l'urine permet d'en éliminer tous les pathogènes pour une utilisation sûre au plan sanitaire. L'évaluation est plus difficile pour les résidus médicamenteux, hormonaux et déchets de produits de soins corporels, qui contiennent des nanoparticules. Il n'existe à ce jour aucun consensus scientifique sur la question et seuls l'enregistrement et l'information sur les substances utilisées sont obligatoires. Les études de l'Anses, l'Agence nationale de sécurité sanitaire, montrent toutefois une contamination des eaux de surface par les médicaments qui suscite des inquiétudes sans pour autant qu'un risque avéré ait été prouvé. Une liste de 906 perturbateurs endocriniens potentiellement dangereux a toutefois été établie par l'OMS.

Exposition du 11 avril au 25 juin 2023

FAIRE CONNAISSANCE

Hélène Launois

HORAIRES D'OUVERTURE :
Du mardi au samedi de 14h à 18h
Le dimanche de 14h à 18h30
Entrée libre

RENSEIGNEMENTS :
Château du Val Fleury
Allée du Val Fleury, Gif-sur-Yvette (Essonne)
01 70 56 52 60

VILLE de GIF www.ville-gif.fr

EN PARTENARIAT
AVEC LE CEA PARIS-SACLAY

cea

VAL FLEURY

Crédit photo : Didier Touzeau, CEA - Nuage transistor (détail)

DÉPOLDÉRISATION Aménagement qui consiste à laisser de nouveau la mer recouvrir les polders, espaces de terre gagnés artificiellement sur l'eau grâce à des systèmes d'endiguement.

TRAIT DE CÔTE Limite entre la terre et la mer, en cas de marée haute, en l'absence d'événement extrême.

PRÉS-SALÉS Appelés également « schorres » (nom scientifique), milieux recouverts périodiquement par l'eau salée, lors des marées, et présentant donc une biodiversité spécifique.

Briser les digues pour sauver le littoral

Comment aménager les littoraux face à l'inévitable montée du niveau de la mer ? Faut-il renforcer les digues ou au contraire les supprimer ? Durant cinq ans, le programme Adapto a exploré ces problématiques sur dix territoires naturels non urbanisés.

N. LAMONTAGNE, A. COLLIN, CGEL, EPHE-PSL

Dans la baie de Lancieux (Côtes-d'Armor), la mer a repris sa place. En mars 2020, une brèche s'est formée sur l'une des trois digues ceinturant la large étendue de prairies de ce site breton, appartenant au conservatoire du Littoral. Depuis, la mer s'y engouffre au gré des marées. La brèche s'est élargie, remplacée par un trou béant. En France, de nombreux aménagements empêchent la mer de pénétrer dans les terres : digues, rochers ou épis bordent près de 3000 des 20 000 kilomètres du littoral. Des ouvrages coûteux, qui montrent d'autant plus leurs faiblesses que le niveau de la mer monte et que s'intensifient des événements climatiques extrêmes. Sur plusieurs de ses sites, dont celui de Lancieux, le conservatoire a donc décidé d'adopter une stratégie différente : entre 2017 et 2022, il a déployé le projet Adapto, qui consiste à limiter les ouvrages en dur et à laisser la mer regagner du terrain *(lire p. 46)*. Dans l'estuaire de la Gironde, plusieurs digues qui ont cédé n'ont pas été remises en état. Sur la plage du Petit Travers, au large de Montpellier (Hérault), c'est une route départementale qui a été reculée. Et sur le site des Vieux Salins d'Hyères (Var), plus de 600 mètres de rochers empilés le long de la côte ont été retirés. Le programme Adapto a été l'occasion d'observer les conséquences de ces décisions. Avec la suppression de ces barrières artificielles, *« on revient à un état plus naturel »*, résume Sophie Sejalon, déléguée adjointe du conservatoire du Littoral de la région Paca. *« Lorsqu'il y a des*

SOPHIE SEJALON

« Lorsqu'il y a des enrochements, le sable ne se dépose pas, ce qui empêche la formation de plages »

Sophie Sejalon, déléguée adjointe du Conservatoire du littoral de la région Paca

BRUNO BOURGEOIS

Pour le polder de Lancieux (Côtes-d'Armor), les modélisations montrent jusqu'où la mer est susceptible de s'infiltrer si le site est laissé en l'état (subir), si la digue ébréchée est réparée (résister), et si trois digues de second rang sont construites (s'adapter).

enrochements, la houle tape dessus, ce qui accentue l'érosion en dessous des rochers ainsi qu'en aval de l'ouvrage. » Ces « points durs » perturbent en outre les échanges hydro-sédimentaires : « *Le sable transporté par les courants ne se dépose pas, ce qui empêche la formation de plages et de dunes* », complète Sophie Sejalon. À l'inverse, libérées de leurs rochers, les plages des Vieux Salins d'Hyères ont rapidement repris du terrain : « *En deux ans, nous avons gagné 5 à 10 mètres d'épaisseur dans les endroits les plus érodés.* »

Ces nouvelles interfaces entre terre et mer, inondées au gré des marées, des courants et des tempêtes, jouent un rôle de protection. « Zones tampons », elles absorbent l'intensité de la houle. Le conservatoire a pu l'observer aux Vieux Salins, lors de deux tempêtes qui ont suivi le désenrochement : les dunes, restaurées, ont pu se mouvoir vers l'arrière, sans céder face aux vagues. Si cette barrière naturelle ne suffit pas toujours à mettre à l'abri les habitations et les terres agricoles situées plus en retrait,

GESTION DU TRAIT DE CÔTE

Les dix sites pilotes d'Adapto

Adapto est un projet porté par le Conservatoire du littoral, et financé à 60 % par l'Union européenne. Objectif : tester une gestion souple du trait de côte sur 10 sites pilotes, majoritairement dénués d'enjeux humains. Ou, en d'autres termes, montrer qu'il est possible de laisser la mer reconquérir des terres, là où des ouvrages de protection l'empêchaient jusqu'alors de pénétrer. Durant cinq ans, Adapto a été l'occasion d'évaluer et d'anticiper les conséquences de telles dépoldérisations, tout en amorçant un changement de paradigme auprès des élus locaux et de la population.

elle peut venir compléter et alléger des ouvrages plus éloignés du rivage, comme l'explique Olivier Brivois, chef de projet au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) : *« À court voire à moyen terme, suivant l'élévation du niveau de la mer, une digue de second rang ne sera pas, à chaque marée, en contact avec la mer, et la végétation des zones dépoldérisées aura tendance à freiner les écoulements. »* En outre, plus la mer aura de la place, plus elle s'étalera, réduisant ainsi sa hauteur et sa force. *« L'énergie devant la digue sera alors atténuée, donc celle-ci pourra être moins résistante, moins haute, ce qui permet d'en diminuer les coûts. »* La question économique est en effet au cœur des stratégies d'aménagement du littoral : quelle sera la protection la plus efficace, sans devenir un gouffre financier ?

Des modélisations pour évaluer la hauteur des digues

Dans le cadre d'Adapto, le BRGM s'est efforcé de fournir des outils d'aide à la décision. Si le niveau de la mer augmente, les ouvrages actuels résisteront-ils ? Jusqu'où l'eau montera-t-elle s'il n'y a plus de digue ? Et si une digue est construite en retrait ? Grâce à ses cartes prospectives, le BRGM a apporté des éléments de réponse : *« Selon la rugosité des sols — vasière, prairies, etc. —, leur topographie, ou encore le niveau de la mer attendu, nos modèles permettent de déterminer où la mer pénétrera »*, détaille Olivier Brivois. Ces modélisations ont été dupliquées selon divers scénarios : avec une digue littorale, rétrolittorale, sans digue, avec une plus ou moins forte élévation du niveau des océans… *« Nos travaux ont permis de tester différentes positions de digues, mais également d'évaluer leur hauteur afin de protéger efficacement les enjeux présents »*, développe le spécialiste. Exemple avec le site du marais de Moëze, près de Brouage (Charente-Maritime) : *« Nos simulations ont montré que, dans la situation*

SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Les atouts des prés-salés et des roselières

Le centre d'expertise et de données pour le patrimoine naturel, PatriNat, a élaboré un indice de qualité écologique pour évaluer les conséquences d'une dépoldérisation. Trois aspects sont étudiés : la diversité mesure le nombre d'espèces recensées (végétation, oiseaux, necton…) ; la patrimonialité évalue la rareté de leurs habitats ; la fonctionnalité permet de recenser les services écosystémiques de ces milieux. Les prés-salés et les roselières jouent par exemple un rôle important dans le stockage des polluants, dans l'atténuation des perturbations physiques, dans la régulation du climat, ou encore dans la filtration de l'eau. Grâce à leur haut degré de patrimonialité et de fonctionnalité, les habitats typiques des sites reconnectés à la mer présentent généralement un indicateur de qualité écologique plus élevé que celui des prairies ou des cultures. Ils sont adaptés à de nouvelles activités : écotourisme, observation des oiseaux, culture de salicorne — plante comestible typique des prés-salés, connue aussi comme « haricot de mer » —, pâturage de moutons… Un élevage de zébus et de buffles est même une option envisagée dans les rizières de Mana, en Guyane.

actuelle, avec une digue de premier rang très haute devant les terrains du conservatoire, l'eau pénétrerait quand même par les terrains adjacents pour un événement similaire à la tempête Xynthia, et que la construction de digues sur ces terrains pourrait même accroître la submersion dans la partie sud du marais », explique Olivier Brivois.

Ces résultats ont conduit les acteurs locaux à réfléchir à une échelle plus large que celle des seuls terrains du conservatoire. En Guyane, sur le site des rizières de Mana, l'étude du BRGM a montré que « *le trait de côte pourrait reculer d'environ 700 mètres d'ici à 2030 et de 1700 mètres d'ici à 2050* », si le site était laissé en l'état. Là-bas, comme aux Vieux Salins, les ouvrages hydrauliques censés protéger les terres tendent à accentuer l'érosion. En les retirant, il serait possible d'atténuer ce phénomène, en utilisant les atouts naturels du site. En effet, les cheniers, cordons de sable qui se forment sur ce littoral, « *constituent une barrière mobile qui peut rouler sur elle-même et limiter l'érosion en arrière* ».

Certaines espèces disparaissent, mais d'autres apparaissent

Dans la baie de Lancieux, les prairies au-delà de la digue, aujourd'hui ébréchée, ont laissé progressivement leur place à des prés-salés. La végétation, assez basse, se mêle à de la vase. L'île Nouvelle (Gironde) a, elle, gagné 128 hectares de roselières depuis que les digues laissent entrer l'eau de l'estuaire. Sur le site du Petit Travers, les dunes grises se sont installées là où passait autrefois la route départementale. Ces milieux spécifiques sont reconnus d'« intérêt patrimonial » : les habitats naturels qui les composent, ainsi que les espèces qu'ils abritent, sont rares, et menacés. « *Lors de leur dépoldérisation, la valeur patrimoniale des sites Adapto a augmenté* », observe Marianne Debue, du centre d'expertise et de données pour le patrimoine naturel PatriNat *(lire l'encadré ci-contre)*. 253 espèces d'oiseaux, dont 58 présentant un fort enjeu de conservation, ont ainsi été recensées dans la mosaïque de roselières, de prés-salés et de fourrés du delta de la Leyre, reconnectés à l'océan dans le bassin d'Arcachon (Gironde). « *La flore s'est réinstallée sur les dunes des Vieux Salins, dont la surface a augmenté de 50 %,* témoigne encore Sophie Sejalon, *elles abritent notamment du chardon et du lis maritimes.* »

MÉTROPOLE TPM

Libérés de leur enrochement (en haut, en 2019), les plages des Vieux Salins d'Hyères (Var) ont rapidement regagné du terrain (en bas, en 2022).

Ces transformations des paysages entraînent cependant une diminution de la diversité de nombreuses espèces, non adaptées aux eaux salées. En parallèle, de nouvelles apparaissent, atteste Marianne Debue : « *Les prés-salés sont notamment des lieux de reproduction et d'alimentation importants du necton* », cette faune marine très variée qui nage dans les courants.

D'autres expérimentations pour mesurer les enjeux humains

Pour donner un aperçu de la façon dont les paysages et leur biodiversité pourraient évoluer sur les différents sites Adapto, le BRGM et PatriNat ont, là encore, établi des cartes prospectives selon différents scénarios d'aménagement. Ainsi, si 115 hectares étaient rendus à la mer sur la baie d'Authie, près de Berck-sur-Mer (Pas-de-Calais), « *un changement de cortège des espèces pourrait être observé sur les terrains reconnectés, avec une stabilisation des populations d'oiseaux et une augmentation du necton* », détaille le bilan de ce site. Dans le marais de Moëze, « *une reconnexion à la mer progressive […] bénéficierait à certaines espèces de poissons, d'oiseaux (le gorgebleue) ou d'insectes (le criquet des salines)* », soulignent encore les conclusions du projet.

Et si laisser la mer (re)gagner du terrain était finalement une solution face à la montée des eaux consécutive au changement climatique ? Adapto a réussi à montrer que l'idée n'est pas saugrenue. Reste qu'une gestion souple suppose certains sacrifices : abandonner des terres agricoles, déplacer des activités… À Lancieux, des personnes ont été relogées, leur maison entrant dans un périmètre menacé de submersion avec l'ébrèchement de la digue. Justement, le conservatoire souhaite étendre ses expérimentations à des sites présentant davantage d'enjeux humains. Démarrage espéré en 2024. ■

Camille Jourdan

« Lors de leur dépoldérisation, la valeur patrimoniale des sites a augmenté »

Marianne Debue, centre d'expertise et de données pour le patrimoine naturel PatriNat

Les clés du contrôle de soi

Les années Covid ont engendré une fatigue mentale chez nombre de Français. Mais rien d'irreversible, rassure le neurobiologiste Jean-Philippe Lachaux qui explique comment le cerveau alterne entre le mode automatique et le mode volontaire. Retrouver un bon contrôle de soi implique aussi de suivre des stratégies claires.

Dossier réalisé par
Cécile Coumau, Hugo Jalinère
et Elena Sender

DÉCRYPTAGE
Apprendre au cerveau à relâcher la pression p. 50

INTERVIEW
Jean-Philippe Lachaux, directeur de recherche Inserm p. 54

SOLUTIONS
Les stratégies à adopter contre la tentation p. 59

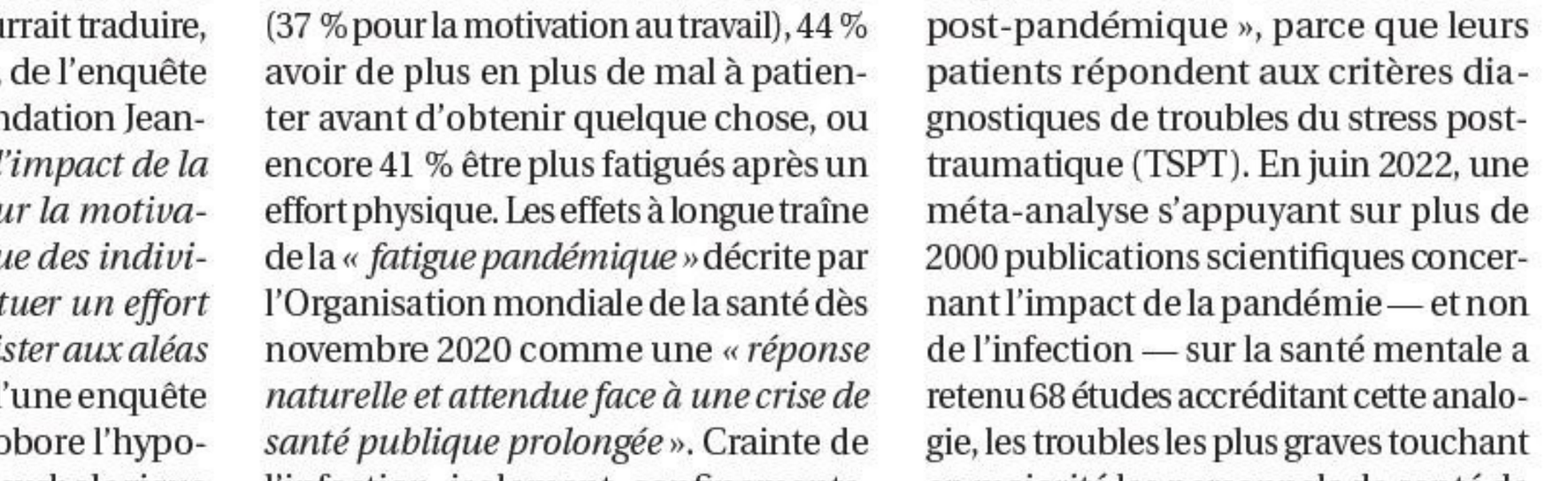
TECHNIQUES
Méditation et hypnose aident à accepter ses émotions p. 63

GETTY IMAGES

Apprendre au cerveau à relâcher la pression

Durant la pandémie de Covid-19, les fonctions exécutives du cerveau ont été beaucoup plus sollicitées afin de nous adapter en permanence au contexte instable. Pour combattre cette fatigue cognitive, il faut réapprendre à automatiser le plus de tâches possible. Explications.

Après la crise sanitaire, il y a de la fatigue dans l'air ! Et c'est notre contrôle cognitif qui trinque. C'est en substance ce qu'on pourrait traduire, sur le plan neurocognitif, de l'enquête menée par l'Ifop et la Fondation Jean-Jaurès pour objectiver *« l'impact de la pandémie de Covid-19 sur la motivation et l'état psychologique des individus, leur capacité à effectuer un effort mental, physique ou à résister aux aléas de la vie »*. Il s'agit certes d'une enquête d'opinion, mais elle corrobore l'hypothèse d'une fragilisation psychologique et mentale due à la crise sanitaire, au moins chez une partie de la population. Fin 2022, 30 % des sondés déclaraient ainsi être moins motivés qu'avant (37 % pour la motivation au travail), 44 % avoir de plus en plus de mal à patienter avant d'obtenir quelque chose, ou encore 41 % être plus fatigués après un effort physique. Les effets à longue traîne de la *« fatigue pandémique »* décrite par l'Organisation mondiale de la santé dès novembre 2020 comme une *« réponse naturelle et attendue face à une crise de santé publique prolongée »*. Crainte de l'infection, isolement, confinements, instabilité chronique du quotidien, injonctions contradictoires… Nombre de psychiatres vont jusqu'à investiguer ce qu'ils nomment « troubles du stress post-pandémique », parce que leurs patients répondent aux critères diagnostiques de troubles du stress post-traumatique (TSPT). En juin 2022, une méta-analyse s'appuyant sur plus de 2000 publications scientifiques concernant l'impact de la pandémie — et non de l'infection — sur la santé mentale a retenu 68 études accréditant cette analogie, les troubles les plus graves touchant en majorité les personnels de santé de première ligne. Sans aller jusqu'à ce



Le « flow » observé dans le cortex

État psychologique où automatismes et contrôle cognitif fonctionnent en harmonie, le *flow* est visualisé dans le cerveau par IRM. L'observation révèle une activation neurale augmentée (en rouge et jaune) dans l'insula et le striatum…

degré de sévérité, durant la crise sanitaire, les fonctions exécutives du cerveau comme la flexibilité mentale, la planification, l'attention, l'inhibition ou la mémoire de travail ont été bousculées, davantage sollicitées, pour nous adapter en permanence au contexte instable. C'est précisément le rôle de ces fonctions du contrôle cognitif. Inversement, les occasions de mettre son cerveau en mode automatique se sont faites plus rares, les automatismes cérébraux n'ayant plus cours.

Une accumulation de glutamate dans le cortex préfrontal

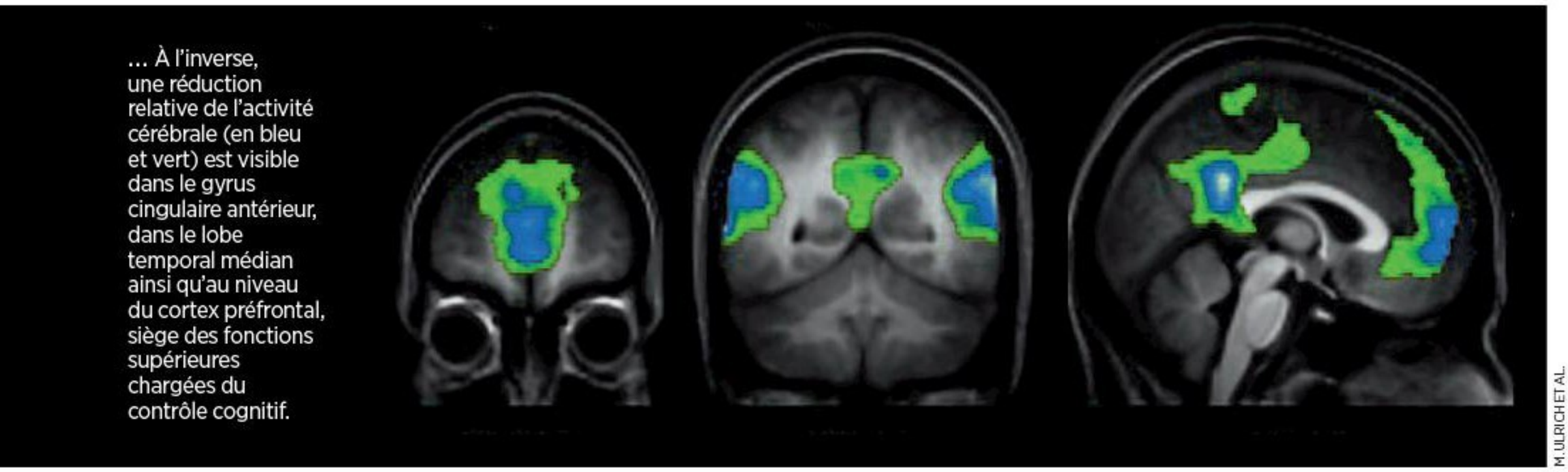
Or, de récents travaux ont démontré la fatigabilité de ces capacités de contrôle cognitif lorsque le cerveau est sursollicité. À l'Institut du cerveau, à Paris, l'équipe Motivation, cerveau, comportement dirigée par Mathias Pessiglione a publié en octobre 2022 une étude dans *Current Biology*, qui dévoile le mécanisme neurobiologique à l'origine d'une fatigue mentale et, donc, d'une baisse d'efficacité des fonctions exécutives, parfois jusqu'à l'épuisement. À l'aide d'une technique d'imagerie, la spectroscopie par résonance magnétique, l'équipe a pu quantifier différents métabolites dans le cerveau de participants à qui il était demandé, selon leur groupe, des tâches nécessitant beaucoup d'attention, ou des tâches cognitives plus simples. Chez ceux qui effectuaient de façon prolongée un travail exigeant sur le plan attentionnel, le cortex présentait une accumulation significative de glutamate, un neurotransmetteur essentiel. « *En conditions normales et lorsque les tâches cognitives sont espacées, il existe un mécanisme spontané d'élimination qui assure une régulation du taux de glutamate,* explique Mathias Pessiglione. *Mais en cas de saturation, cette molécule s'accumule au niveau des synapses — les zones de contact entre deux neurones — et, en trop forte concentration, devient nuisible, empêchant l'activation normale et le bon fonctionnement du cortex préfrontal latéral.* » Or, le cortex préfrontal est bien le principal siège des fonctions exécutives.

44 %
des Français se déclarent plus impatients qu'avant la pandémie de Covid-19.

30 %
se disent moins motivés.

SOURCE: FONDATION JEAN-JAURÈS, IFOP.

Ces travaux font écho à une précédente étude de la même équipe parue en 2019 et conduite chez des sportifs de haut niveau, pour mettre en évidence les mécanismes à l'origine du *burn-out* du sportif. À l'époque, 37 triathlètes avaient été répartis en deux groupes : le premier suivait un entraînement professionnel normal, tandis que le second avait une charge de travail augmentée, jusqu'à 40 % de temps d'entraînement supplémentaire les trois dernières semaines de l'expérience. Suivis sur le plan comportemental et par IRM fonctionnelle du cerveau, les sportifs du second groupe présentaient une fatigue cognitive visible dans la réduction d'activité du cortex préfrontal latéral. « *Cette diminution de l'activité cérébrale se traduit par des décisions impulsives, privilégiant les gratifications à court terme plutôt que les buts à long terme,* précise Mathias Pessiglione. *Elle favorise l'impatience, le plaisir immédiat, les comportements agressifs et autres manifestations comportementales d'un défaut de contrôle. Dans le cas d'un athlète de haut niveau, cette impulsivité peut par exemple donner lieu à la décision de s'arrêter en pleine performance sportive ou d'abandonner une course pour faire cesser la douleur ressentie pendant l'effort.* » La motivation à terminer la course, soit l'endurance cognitive nécessaire pour maintenir un effort de plus en plus difficile, est affaiblie parce que le cortex préfrontal est en surchauffe. Selon l'hypothèse de plus en plus étayée de l'équipe de l'Institut du cerveau, c'est par ce phénomène d'usure neuronale que la fatigue se transforme en épuisement, le fameux *burn-out*. Jusqu'à perdre tout contrôle, donc. Mais « *la neurobiologie sous-jacente à cette fatigue cognitive entre en jeu dès qu'on mobilise un contrôle attentionnel intense et prolongé, c'est-à-dire dans toute activité qui ne peut pas se reposer sur des automatismes déjà bien rodés* ». ▶



… À l'inverse, une réduction relative de l'activité cérébrale (en bleu et vert) est visible dans le gyrus cingulaire antérieur, dans le lobe temporal médian ainsi qu'au niveau du cortex préfrontal, siège des fonctions supérieures chargées du contrôle cognitif.

M. ULRICH ET AL.

C. DÉGREMONT/LOOKATSCIENCES

JEAN-POL TASSIN

NEUROBIOLOGISTE EXPERT DES ADDICTIONS, DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE À L'INSERM

« Avec l'addiction, il n'y a plus de possibilité de contrôle des impulsions »

“Les addictions constituent des pathologies graves du contrôle à part entière et sont à distinguer d'un contexte non pathologique. En principe, lorsqu'on planifie une activité ou qu'on se concentre pour accomplir une tâche, le cerveau fait intervenir un certain nombre de neurotransmetteurs, en particulier les modulateurs tels que la noradrénaline, la dopamine et la sérotonine, qui sont en lien les uns avec les autres. Par exemple, pour réussir correctement une tâche cognitive donnée, on a besoin d'avoir une activation noradrénergique sur des systèmes corticaux et, en retour, une réactivation sous-corticale dopaminergique qui permet de focaliser son attention et de recruter sa mémoire de travail. Dans le cas d'une addiction, l'hypothèse, bien étayée aujourd'hui, c'est que le lien entre les systèmes à noradrénaline et à sérotonine devient défectueux. Ces systèmes sont désynchronisés et ne peuvent donc pas se réguler l'un l'autre. Ainsi, lorsqu'il y a une impulsion noradrénergique, la sérotonine normalement chargée de contrôler cette impulsion n'est plus activée. Par conséquent, l'individu connaît un *craving* [l'envie irrépressible de consommer le produit] très puissant qui ne peut plus être contrôlé par la sérotonine. Dans ce cas de figure, il n'est plus vraiment question de volonté ou de motivation, puisque le système d'allers-retours pour un contrôle mutuel n'existe plus. C'est la grande différence avec un traitement de l'information non pathologique. En principe, dans un système nerveux qui n'est pas dépendant d'une substance, vous avez la possibilité, à l'occasion d'un désir assez fort, de contrôler celui-ci et d'éviter que cela prenne une forme impulsive. De la même façon, pour qu'un traitement cognitif soit correct, il faut qu'il y ait à la fois une certaine motivation et pas trop de stress. La sérotonine permet en principe au système noradrénergique de rester dans la fenêtre de fonctionnement optimale, entre motivation et stress. Or, chez les personnes souffrant d'addictions, un phénomène analogue à un stress est très vite prépondérant. C'est comme si la noradrénaline était un coureur de vitesse, et la sérotonine un coureur de fond. Ils sont tous les deux reliés par une ficelle. Les deux partent ensemble, mais la ficelle qui les lie permet, par exemple, au coureur de fond de modérer le sprinteur. Lors de la prise répétée de substances addictives, les deux systèmes fonctionnent ensemble, et donc la ficelle qui les lie, c'est-à-dire la régulation, disparaît. Il n'y a donc plus de possibilité de contrôle de toutes formes de désir ou d'impulsion.”

GETTY IMAGES

La dépendance aux substances addictives désynchronise les neurotransmetteurs dans le cerveau.

L'une des clés pour exercer au mieux ses capacités de contrôle cognitif est donc d'abord… de savoir lâcher prise aussi souvent que possible !

C'est à ce consensus en forme de paradoxe qu'arrive aujourd'hui la recherche en neurosciences cognitives. Il faut apprendre au cerveau à automatiser le plus de tâches possible pour relâcher la pression sur le cortex préfrontal. L'équipe de Jean-Philippe Lachaux, au Centre de recherche en neurosciences de Lyon *(lire l'entretien p. 54)*, a ainsi montré que notre cerveau a tendance à exercer plus de contrôle que nécessaire sur des tâches pouvant largement être accomplies en mode automatique. Il s'agit là d'activer des automatismes cérébraux acquis — écriture, tables de multiplication, marche, réponse à des questions simples, etc. — et non de se laisser aller à la rêverie. Nombre de stratégies et techniques peuvent ainsi être employées pour automatiser le fonctionnement cognitif et le rendre plus fluide *(lire p. 59)*. L'objectif étant de faire fonctionner le contrôle cognitif avec parcimonie.

Une hyperconcentration sans effort

Le modèle idéal d'un tel exercice des fonctions exécutives à partir d'automatismes bien ancrés ? C'est peut-être bien le *flow* (flux en français), un concept de la psychologie positive forgé en 1975 par Mihály Csíkszentmihályi (1934-2021) professeur à l'université de Chicago (États-Unis). Le *flow* désigne un état, bref ou prolongé, dans lequel l'individu est totalement absorbé par sa tâche, au point que les pensées autoréférentielles s'effacent, le sujet ne faisant plus qu'un avec son objet. Un état de concentration intense qui demande pourtant peu d'effort cognitif et s'accompagne d'un sentiment d'accomplissement et d'une grande satisfaction.

En 2021, une revue de la littérature des bases neurobiologiques du *flow* publiée dans *Frontiers in Psychology* par une équipe néerlandaise retenait trois critères pour expérimenter cet état : d'abord, « *l'adéquation entre les compétences de la personne et les enjeux de la tâche* ». Trop facile, celle-ci conduira à l'ennui, trop difficile, à la frustration et au stress. Ensuite, « *une forte concentration attentionnelle, impliquant l'inhibition des stimuli et pensées sans rapport avec la tâche* ». Enfin, « *les faibles niveaux de pensée autoréférentielle* », c'est-à-dire les réflexions sur soi, « autobiographiques ». Le *flow* est ainsi généralement atteint dans une discipline ou un loisir bien maîtrisés, de la simple lecture à la pratique sportive, artistique, etc. Il n'a rien d'exceptionnel. Ce qui l'est davantage, c'est d'y passer du temps fréquemment. Or, le *flow* constitue une expérience singulière bénéfique du contrôle cognitif en ce qu'elle permet d'accomplir une activité intrinsèquement enrichissante, qui entraîne les fonctions exécutives à ne s'exercer que lorsque c'est nécessaire.

L'imagerie montre une activité réduite du lobe préfrontal

C'est ce que tendent à corroborer les études d'imagerie cérébrale menées lors d'expériences de flux reproduites avec des tâches de calcul mental, qui montrent une réduction de l'activité du lobe préfrontal. En 2020, c'est un funambule professionnel qui a joué le cobaye lors d'une performance pour l'unité de recherche en neurophysiologie et biomécanique du mouvement de l'Université libre de Bruxelles (Belgique). À l'aide d'un casque d'électroencéphalographie à haute densité, les scientifiques ont quantifié les ondes neuronales caractérisant le « flux » psychologique par rapport à un état de « stress » conscient lorsque le funambule se trouvait en difficulté sur la corde raide et sortait du flux pour mobiliser plus de contrôle. Là aussi, les périodes de flux étaient caractérisées par une activité réduite du lobe préfrontal.

Voilà un état à rechercher pour retrouver le bon équilibre, le bon contrôle de soi. Plusieurs approches, techniques et astuces ont été validées ces dernières années pour y parvenir *(lire p. 59)*. Les découvrir, c'est déjà commencer à reprendre le contrôle de soi. ■

H. J. @HugoJaliniere

PRÉDISPOSITIONS

Le contrôle de soi, c'est aussi de la génétique

En 2021, à partir de l'analyse de 1,5 million de personnes, l'équipe de Danielle Dick, professeure de psychologie et de génétique humaine à la Virginia Commonwealth University (États-Unis), a identifié 579 emplacements dans le génome associés à une prédisposition à des troubles de l'autorégulation, y compris la dépendance et l'hyperactivité. *« Notre étude montre que les gènes ne codent pas pour un trouble en particulier ; il n'y a pas de gènes "pour" les troubles liés à l'utilisation de substances ou les problèmes de comportement*, explique la chercheuse. *Mais ils influencent la façon dont notre cerveau est câblé, et nous constatons qu'il existe des gènes qui influencent largement la maîtrise de soi ou l'impulsivité, et que cette prédisposition confère alors un risque pour une variété de résultats dans la vie. »*

M. PESSIGLIONE

« La neurobiologie de la fatigue cognitive entre en jeu dès qu'on mobilise un contrôle attentionnel intense et prolongé »

Mathias Pessiglione, directeur de l'équipe Motivation, cerveau et comportement à l'Institut du cerveau, à Paris

JEAN-PHILIPPE LACHAUX
DIRECTEUR DE RECHERCHE INSERM AU CENTRE DE RECHERCHE EN NEUROSCIENCES DE LYON

« Il faut savoir opter pour le bon niveau de contrôle de soi »

Tout au long de la journée, l'humain prend des millions de décisions. Elles peuvent être dictées par les habitudes ou bien dirigées vers un but. Le chercheur explique comment trouver le bon équilibre entre le mode automatique et le contrôle de soi volontaire.

Quand le contrôle de soi survient-il ?
Jean-Philippe Lachaux : Il peut intervenir dès que l'on prend une décision. Or, chaque jour, nous en prenons des millions. Chaque mot que l'on choisit de prononcer, chaque chose que l'on regarde ou que l'on fait est une décision. Et elle peut se produire de deux façons. Soit en utilisant ses automatismes sans avoir besoin de réfléchir. En neurosciences cognitives et comportementales, on appelle ce mode « dicté par les habitudes » (*habbit driven behavior* en anglais). Soit on met en œuvre un mode dit dirigé vers un but (*goal driven behavior*), qui nécessite de freiner le mode automatique pour s'engager dans une action volontaire. C'est cela le contrôle de soi ou *self-control*.

Donnez-nous un exemple de ces deux modes possibles...
Pour caricaturer, vous rentrez le soir du travail, vous vous écroulez dans votre canapé. Le mode automatique, dirigé par l'habitude vous fait enlever vos chaussures et allumer la télévision. Le mode « dirigé vers un but » — contrôle de soi — vous fera vous relever, mettre votre jogging et aller faire du sport, parce que vous avez décidé d'avoir une vie plus saine.

Quel est l'avantage du mode « automatique » ?
Celui-ci est tellement ancré dans des réseaux neuronaux spécifiques qu'il ne nécessite plus d'attention de notre part. Je ne réfléchis pas quand je fais quelque chose par habitude. Or l'attention est une ressource limitée et précieuse. Le mode automatique permet donc de libérer de la ressource attentionnelle. Il ne veut cependant pas dire mode « idiot ». On peut avoir des automatismes évolués. Par exemple lorsqu'on récite les tables de multiplication ou qu'un sportif de haut niveau exécute un geste technique difficile tellement répété qu'il s'est automatisé.

Et celui du mode « contrôle » ?
Il permet d'orienter notre action mentale et physique pour dépasser nos limites, apprendre de nouvelles tâches. Mais aussi se débarrasser de mauvaises habitudes, éviter des paroles ou des actions trop spontanées, maladroites ou risquées pour notre santé. Ce mode est très valorisé dans nos sociétés et des études en ont montré l'intérêt. Celle par exemple de l'équipe de Terrie Moffitt, de l'université Duke aux États-Unis. Elle a suivi une cohorte de 1000 enfants de la naissance à 32 ans et a montré que plus les enfants avaient développé une maîtrise de soi pendant

BIO EXPRESS

- **1990-1993 :** École polytechnique, Palaiseau (Essonne).
- **1994-1997 :** Doctorat en philosophie, neurobiologie et neurosciences à l'université Pierre-et-Marie-Curie, Paris.
- **Depuis 2008 :** Directeur de recherche à l'Inserm ; codirecteur de l'équipe Eduwell (neurosciences de l'expérience subjective et entraînement mental) au Centre de recherche en neurosciences de Lyon.
- **2014 :** Lancement du programme Attentif à l'école (Atole).
- **Publications :** *Le Cerveau attentif* (2011), *Le Cerveau funambule* (2015), *Les Petites Bulles de l'attention* (2016), *La Magie de la concentration* (2020), éd. Odile Jacob.

BRUNO LEVY /DIVERGENCE POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

> Chaque mot que l'on prononce, chaque chose que l'on regarde ou que l'on fait est une décision. Et elle peut se produire de deux façons

l'enfance, meilleures étaient leur santé physique et leur situation financière à l'âge adulte. Avec moins de toxicomanie et de délinquance.

Comment étudie-t-on la capacité de maîtrise de soi ?

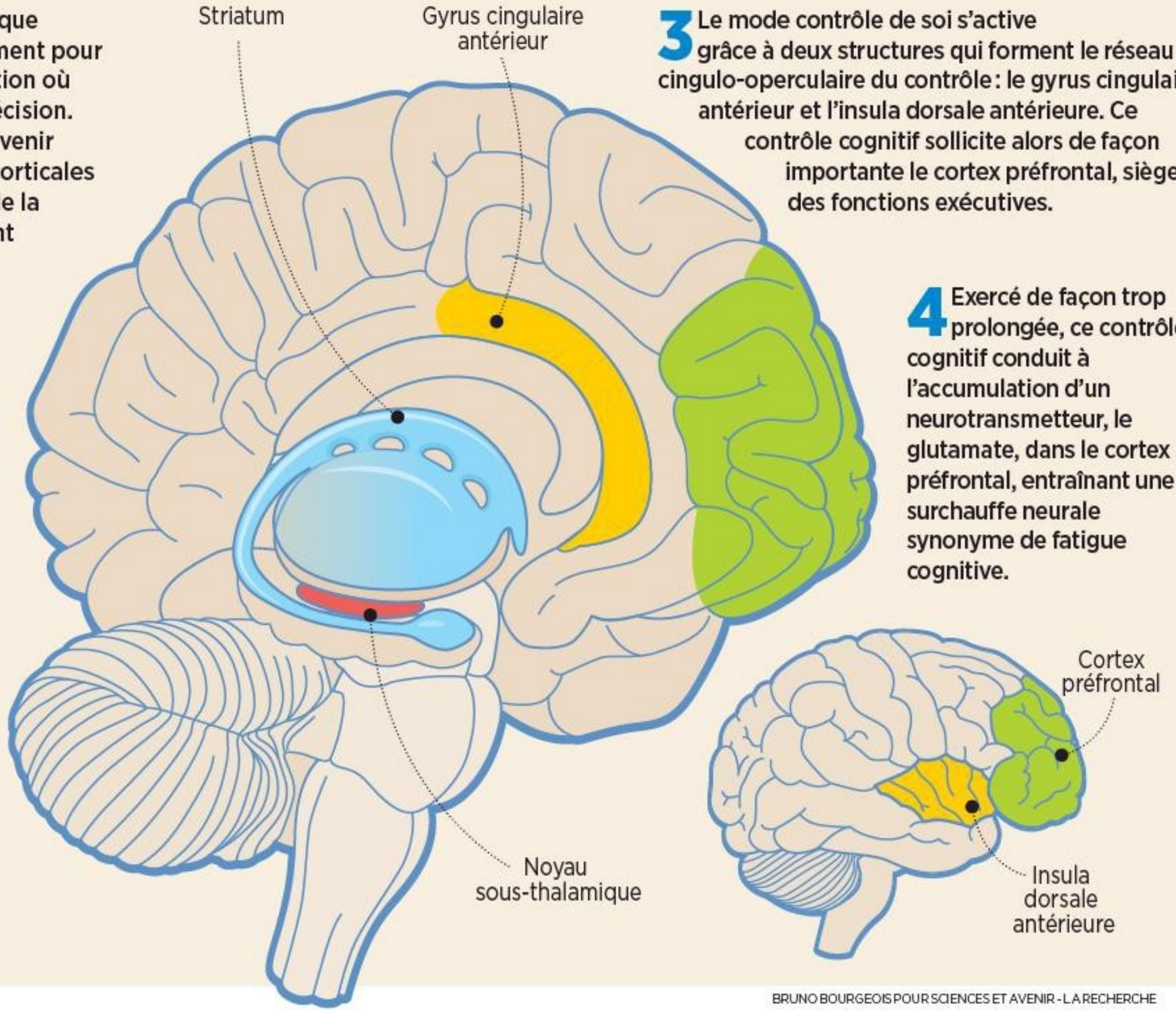
On peut utiliser classiquement le test de Stroop. Sur un écran il y a une succession de noms de couleurs écrits de la couleur correspondante, « jaune » écrit en jaune, « vert » en vert, etc. On demande au participant de lire les mots le plus vite possible. Pour un bon lecteur, c'est automatique. Les reconnaissances de la couleur et du mot sont immédiates et le mot vient à l'esprit instantanément. Dans la seconde phase du test, « jaune » est écrit en vert, « rouge » en bleu, etc. Et là, ça se complique. Le fait de poser son regard sur « jaune » écrit en vert active la zone de reconnaissance de la couleur verte. Le lecteur va devoir freiner l'automatisme « vert » pour passer en mode « contrôle » et dire « jaune ». Dans la première situation, on active des zones impliquées dans la lecture automatique. Dans la seconde, c'est tout un système cérébral qui doit freiner l'automatisme et le remplacer par une réponse contrôlée. On remarque, au passage, que ce deuxième mode exige un délai de traitement plus long que le premier. Plus on est rapide à ce test, meilleure est notre capacité de contrôle.

Quelles sont les zones cérébrales impliquées ?

Des dizaines d'expériences ont été menées sous IRM fonctionnelle — technique d'imagerie qui permet de visualiser l'activité du cerveau en temps réel — pour voir ce qu'il se passe dans les deux modes *(voir l'infographie p. 56)*. Mais aussi observer que pour passer du mode automatique au mode contrôlé, il faut actionner un mécanisme de freinage des automatismes et permettre à la solution la moins rapide — processus de contrôle — de prendre le dessus. Après avoir freiné, il faut ensuite déterminer le niveau de contrôle dont on a besoin, appelé « valeur attendue du contrôle » (*expected value of control,* EVC en anglais) décrite par l'équipe de Jonathan Cohen, de l'université de Princeton (États-Unis). Cela correspond à la dose de contrôle que l'on estime nécessaire pour parvenir à un objectif. Parfois notre

ACTIVATION

Comment le cerveau passe du mode « automatique » au mode « contrôle de soi »



1 Le mode automatique s'active spontanément pour répondre à une situation où il faut prendre une décision. Il fait largement intervenir des structures sous-corticales appelées ganglions de la base, particulièrement le striatum.

2 Si la réponse ne semble pas adaptée, le cerveau actionne un mécanisme de freinage des automatismes mis en œuvre par plusieurs structures cérébrales, parmi lesquelles le noyau sous-thalamique, au centre du cerveau, et la partie inférieure et latérale du cortex préfrontal, principalement à droite.

3 Le mode contrôle de soi s'active grâce à deux structures qui forment le réseau cingulo-operculaire du contrôle : le gyrus cingulaire antérieur et l'insula dorsale antérieure. Ce contrôle cognitif sollicite alors de façon importante le cortex préfrontal, siège des fonctions exécutives.

4 Exercé de façon trop prolongée, ce contrôle cognitif conduit à l'accumulation d'un neurotransmetteur, le glutamate, dans le cortex préfrontal, entraînant une surchauffe neurale synonyme de fatigue cognitive.

BRUNO BOURGEOIS POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

cerveau se trompe ! Il évalue mal l'EVC et passe en mode contrôle alors que les automatismes auraient été suffisants. Cette surdose de contrôle peut potentiellement être délétère pour le cerveau car ce mode a un gros inconvénient.

Quel est cet inconvénient du mode « contrôle » ?

La fatigue ! Les structures impliquées dans le contrôle de soi — gyrus cingulaire antérieur et insula antérieure dorsale — sont des régions dont l'activation est le plus associée à la fatigue cognitive. Chez les sportifs de haut niveau, la sensation d'épuisement arrive le plus souvent lorsqu'ils ont dû exercer un contrôle fort. Les parachutistes ont, par exemple, une épreuve dite de précision d'atterrissage qui consiste à sauter de 1000 mètres d'un avion et venir poser son talon sur une cible de la taille d'une pièce de 10 centimes d'euro au centre d'un disque de 16 centimètres de diamètre. Pendant les dix dernières secondes de descente, ils sont donc dans l'hypercontrôle de leur activité cognitive. Après cette épreuve qui dure quelques secondes, certains racontent mettre plusieurs heures à s'en remettre !

Dans quel cas le contrôle de soi fonctionne-t-il mal ?

Le stress est mauvais pour le *self-control*. Un stress élevé est en effet perçu comme un signal de danger par le cerveau qui, en réponse, cherche à gagner du temps. Les hormones du stress, tel que le cortisol, participent à un système qui court-circuite le système de frein, ce qui inhibe la maîtrise de soi et favorise les automa-

tismes. Mieux vaut alors avoir de bons schémas d'action programmés, pour savoir répondre aux situations stressantes. Et ne pas hésiter à ralentir, pour éviter la fuite en avant des automatismes et rétablir consciemment une forme de frein à main.

Quelle autre situation favorise les automatismes ?
Le soir, on est moins apte à exercer le contrôle de soi. Si on est épuisé de sa journée, on va se mettre à manger ce qui tombe sous la main, regarder le énième épisode d'une série TV alors qu'on devrait dormir. On préfère obtenir une gratification immédiate qu'un bienfait à plus long terme — comme être en forme le lendemain après une bonne nuit. Cela viendrait de ce qu'on appelle « l'épuisement de l'*ego* ». La maîtrise de soi est — comme l'attention — une ressource limitée. Si on l'utilise beaucoup au cours de la journée pour atteindre un objectif, il sera plus difficile d'en user pour accomplir les tâches suivantes le soir.

Comment tenir alors de bonnes résolutions ?
Une contrainte quelle qu'elle soit (alimentaire, sportive…) qui demande un contrôle volontaire constant ne pourra être prolongée dans le temps à cause de ce phénomène d'épuisement. Tant que la nouvelle résolution (mieux manger, faire du sport…) n'est pas entrée dans le domaine de l'habitude, elle va reposer sur ces structures cérébrales qui fatiguent. Quelques secondes d'inattention suffisent pour craquer. La seule manière de tenir une résolution est donc d'en faire un nouvel automatisme, mis en œuvre par des structures qui pourront être activées sans s'épuiser. Si vous voulez changer de régime ou vous mettre au sport, il faut changer de mode cérébral !

Existe-t-il des maladies du contrôle ?
On peut signaler le trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH), dans lequel le contrôle de soi fonctionne mal. Chez les personnes qui en souffrent, la moindre distraction déclenche le retour des réactions automatiques. Les troubles obsessionnels compulsifs (TOC) sont également un trouble du contrôle. Les TOC proviennent essentiellement de dysfonctionnements au sein de structures sous-corticales, parmi lesquelles le noyau sous-thalamique, le frein des automatismes. La personne touchée ne peut donc s'empêcher de faire certaines actions à répétition. *A contrario*, il y a des troubles qui mènent à trop de contrôle. C'est le cas des personnes atteintes de phobie sociale. Elles guettent le moindre signe des autres, surveillent le moindre mot, réfléchissent longtemps avant d'oser parler. Cela conduit à l'épuisement.

> « Chez les sportifs de haut niveau, la sensation d'épuisement arrive le plus souvent lorsqu'ils ont dû exercer un contrôle fort »

Il n'est pas simple de trouver la bonne dose entre contrôle de soi et automatismes…
En effet. Prenez un joueur de tennis, par exemple, qui sait parfaitement exécuter un service parce qu'il en a fait des centaines de milliers dans sa vie. Si soudain, sur un point décisif, par peur de rater son coup, il se met à vouloir contrôler son mouvement automatisé, il va perdre sa fluidité et c'est la double faute assurée. Cela peut se produire aussi pour un pianiste lors d'un concert. S'il cherche à contrôler ses doigts, le morceau ne coule plus. C'est pourquoi on recommande d'automatiser au maximum ce que l'on a à faire lors d'une épreuve et ne pas chercher trop de contrôle le jour J. Mais cette forme de lâcher-prise demande paradoxalement une grande confiance dans ses automatismes, alors que si on est stressé, c'est justement le signe que l'on n'est pas capable d'avoir cette confiance ! L'autre solution consiste à se détacher de l'enjeu, ce qui contribue à minimiser le risque ressenti, et donc le stress.

Quelles méthodes peuvent nous aider à trouver un équilibre ?
La méditation est un excellent exercice de contrôle de soi. L'attention est portée sur le souffle par exemple et quand elle commence à dériver, on la ramène sur l'objet. Ce qui est intéressant avec la respiration, c'est qu'il est au départ difficile de l'observer sans chercher à la contrôler et respirer d'une certaine manière. Cette forme de méditation développe donc la capacité d'observer avec le bon recul les processus automatiques avec lesquels notre « volonté » n'a pas besoin d'interférer. L'hypnose aussi peut aider *(lire p. 63)*. Elle capte l'attention et permet au mental de se projeter ailleurs. Pour se préparer à une épreuve, cela peut être très bénéfique. Par exemple, si l'on reprend le cas du pianiste terrifié d'entrer dans la salle de concert, il peut travailler en hypnose à vivre cette scène afin que, le jour J, il puisse laisser ses automatismes s'exprimer sans trop contrôler.

Contrôle de soi ou lâcher-prise, où placer le curseur ?
C'est toute la subtilité de l'exercice. Julien Lizeroux, skieur alpin, vice-champion du monde, raconte que pour descendre un slalom olympique il ne laisse pas totalement libre cours à ses automatismes sur lesquels il exerce un certain niveau de contrôle. Il explique très bien pourquoi c'est si difficile : si on est trop dans le contrôle, on perd en fluidité et en vitesse, mais si on *« lâche totalement les chevaux »*, selon son expression,

BRUNO LEVY POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

« Il y a un curseur à positionner de façon optimale entre contrôle et lâcher-prise, entre conscience crispée et inconscience »

c'est la chute quasi assurée. Il y a donc un curseur à positionner de façon optimale entre contrôle et lâcher-prise, entre conscience crispée et inconscience. Lorsqu'il parvient à mettre le curseur au bon endroit, il se retrouve dans un état optimal, un état dit de *flow* (flux en français).

Décrivez-nous l'état de « flow »...

C'est l'état idéal recherché par tous les athlètes, qui peut être vécu par tout le monde, où tout paraît facile et évident. Comme si une voix intérieure (le cerveau des automatismes) dictait quoi faire et il n'y a plus qu'à ajuster avec un peu de contrôle. Comme si nos automatismes de bas niveau (pour le contrôle des gestes) et de haut niveau (pour prendre automatiquement la décision la mieux adaptée à la situation) étaient aux commandes. Dans le *flow*, il y a une forme de disparition du « moi » volontaire : comme si toutes nos actions découlaient de façon naturelle de la situation globale, qui « décide » pour nous. D'une certaine façon, « je » devient un intermédiaire inutile entre cette situation et nos propres actions. Mais l'état de *flow* disparaît quand nous ne nous autorisons plus cette forme d'abandon. Au moment où l'on prend conscience de ce que l'on est en train d'accomplir, la sensation s'évanouit : nous ressentons un risque soudain à continuer de la sorte et nous basculons à nouveau dans un mode de contrôle volontaire exagéré. Martin Fourcade, biathlète, quintuple champion olympique, raconte qu'en vingt ans, il a connu cet état de *flow* quatre fois seulement !

Comment peut-on travailler ce bon niveau de contrôle ?

On peut commencer par des petits exercices d'observation de ses automatismes de bas niveau. Apprendre à se « regarder faire » en intervenant le moins possible avec notre volonté et nos objectifs. Comme si nos automatismes étaient des petits enfants que l'on regardait jouer depuis le banc dans un square, en appliquant un contrôle volontaire par petites touches, au lieu de crier sans arrêt. Nous pouvons commencer par observer de la sorte notre respiration, ou les déplacements spontanés de notre regard, puis nos gestes pour manipuler les choses autour de nous, puis enfin, à force d'entraînement, nos automatismes cognitifs de plus haut niveau, à l'origine de nos paroles et de nos pensées. Comment je réponds à quelqu'un au téléphone ou à un courriel, quelles formules j'emploie par exemple. Au fur et à mesure, on prend conscience qu'une multitude de mécanismes automatisés sont déjà bien en place, rodés et fiables. Alors, lorsqu'on se retrouve par exemple devant beaucoup de courriels à traiter et que le stress monte, on respire. On ouvre ceux-ci un par un et on laisse son cerveau exercer ses automatismes que l'on peut diriger avec un peu de contrôle mais pas trop. Au fond, trouver le bon équilibre, c'est faire confiance à ses automatismes et ajuster le juste contrôle qui convient. C'est se fier à son cerveau. ■

Propos recueillis par E. S.

Pour résister à la tentation de certains aliments, mieux vaut éviter de les avoir à portée de main plutôt que d'user de sa volonté, grande consommatrice d'énergie pour le cerveau.

Les stratégies à adopter contre la tentation

La volonté ne fait pas tout ! Qu'il s'agisse de se remettre au sport ou de manger sainement, une phase d'introspection est d'abord nécessaire pour soupeser sa motivation avant de passer à une phase d'action.

En ce début de printemps, la majorité des bonnes résolutions prises en janvier ne sont déjà plus d'actualité. Selon certaines études, 80 % d'entre elles sont totalement abandonnées au bout d'un mois et demi. Tenir les belles promesses que l'on se fait n'est pourtant pas mission impossible. À condition de muscler le contrôle de soi pour *« déjouer le biais du présent »*. Car *« notre cerveau tend à survaloriser les gratifications immédiatement disponibles et à dévaloriser celles pour lesquelles il faut attendre »*, prévient Yves-Alexandre Thalmann, professeur de psychologie et auteur de *Motivations* (éd. humenSciences). Et ce renversement des préférences n'épargne personne. Pour le désactiver et ne pas agir sous le coup de l'impulsivité, il faut donc se montrer stratège.

La première erreur, à ne pas commettre, est de considérer que tout n'est qu'une question de volonté. Pour n'importe quel changement de comportement, la volonté sert à prendre la décision mais pas à surmonter les obstacles. Pire, ce *« willpower »*, comme le nomment les Anglo-Saxons, peut s'avérer contre-productif. Des chercheurs du Laboratoire de la poursuite des objectifs et de l'autocontrainte de l'université Carleton d'Ottawa et du Laboratoire des neu-

GETTY IMAGES

rosciences sociales de l'université de Toronto, au Canada, ont montré que les étudiants qui avaient parié sur leur seule volonté pour résister aux tentations avaient échoué. Ils en concluaient que « *la maîtrise de soi par l'effort n'est pas liée à l'atteinte des objectifs* ». Sans compter que le simple fait de subir des tentations conduisait les personnes à se sentir épuisées. Ce constat fait écho à la théorie de l'*ego depletion*, autrement dit l'épuisement du moi, élaboré par le psychologue américain Roy Baumeister. Selon ce dernier, l'autocontrôle fonctionne par entraînement à l'instar d'un muscle, mais peut aussi subir un « claquage » si on le sollicite trop. Cette théorie est aujourd'hui contestée par une partie de la communauté scientifique. « *En fait, nous ne savons pas très bien définir la fatigue mentale* », indique Fabien Fenouillet, professeur de psychologie positive des apprentissages à l'université de Paris Nanterre et auteur de *La Motivation* (éd. Dunod). En revanche, un point fait consensus : la motivation résiste au temps si elle repose sur l'autodétermination. « *Nous sommes plus persistants pour des buts que nous avons réellement choisis* », décode Fabien Fenouillet. Si l'objectif est par exemple une perte de poids, un travail d'introspection pour repérer ses motivations personnelles s'avérera particulièrement pertinent. Quelle est ma motivation intrinsèque, autrement dit mon envie profonde ? Et quelle est ma motivation extrinsèque ? La perte de poids n'est alors qu'un moyen pour satisfaire un autre besoin…

Mais la motivation, si profonde soit-elle, n'est pas à elle seule une garantie de succès. Tout d'abord parce que les émotions (colère, stress, anxiété…) risquent de nous faire dévier de notre trajectoire. La pratique de la méditation *(lire p. 63)* peut s'avérer une solution. En effet, comme l'expliquait dans nos colonnes le neurologue Steven Laureys, professeur de clinique au Centre du cerveau du CHU de Liège (Belgique), « *c'est une gymnastique mentale qui n'a rien de magique ni d'ésotérique, et qui exerce la capacité de régulation de l'attention et des émotions.* » *(Lire* S. et A. *n° 875, janvier 2020.)* Pour passer de la théorie à la pratique et transformer son envie en un but concret, « *il va aussi falloir mettre en place des stratégies volitionnelles, qui sont des stratégies de l'action* », déclare Fabien Fenouillet. Comment vais-je m'y prendre concrètement pour faire du sport régulièrement ou diminuer ma consommation de sucres ? Quels leviers dois-je activer ? Six techniques applicables au quotidien peuvent être déployées.

LUISA RICCIARINI / BRIDGEMAN IMAGES

Pour s'assurer de ne pas céder au chant des sirènes, Ulysse a ordonné à ses marins de l'attacher au mât de son navire.

STRATÉGIE

Ulysse, un exemple à suivre

Le héros de la guerre de Troie connaissait ses faiblesses. Il savait qu'il ne résisterait pas au chant ensorcelant des sirènes. Pour les écouter sans être tenté de se jeter à l'eau, Ulysse trouve un moyen imparable : il demande à ses marins, équipés de bouchons de cire dans les oreilles, de l'attacher au mât de son navire et de ne le détacher sous aucun prétexte. Cette stratégie, qui fut victorieuse, est appelée aujourd'hui par les psychologues le « pré-engagement ». Et comme le montre Ulysse, ce système exige l'intervention d'un tiers pour s'assurer que l'on ne succombera pas à la tentation. Et de bien connaître les chants des sirènes qui vous font craquer…

Ne pas se soumettre à la tentation

Si vous n'achetez pas de chocolat, vous ne risquez pas de craquer en passant devant le placard de la cuisine. Basique, la méthode est plus efficace, et moins consommatrice d'énergie, que celle consistant à user de sa volonté pour ne pas céder à la tentation. Dans ce cas, la volonté n'est pas réduite à néant mais utilisée à d'autres fins : éliminer les obstacles avant qu'ils ne se présentent en aménageant son environnement. C'est la théorie du pré-engagement, tel Ulysse qui se fait attacher au mât de son navire pour ne pas succomber au chant des sirènes *(lire l'encadré ci-contre)*. « *Cette stratégie implique que quelqu'un d'autre fasse le nœud pour*

qu'au moment où la tentation se présentera, vous n'ayez pas à réfléchir », précise Yves-Alexandre Thalmann.
Pour ne pas se laisser distraire par les notifications intempestives d'un smartphone, il est possible d'avoir recours à des logiciels ou des applications qui vont faire barrage. Par exemple, l'appli gratuite Self Control ne laisse aucune issue de secours. Une fois la durée de blocage définie, on ne peut plus revenir en arrière, ni même supprimer l'application : simple et radical. Or, les stratégies optimales pour réduire les échecs de la maîtrise de soi dépendent beaucoup de *« leur facilité de mise en œuvre »*, indique Angela Duckworth, psychologue américaine auteure d'une revue de la littérature sur les approches visant à réduire les échecs de la maîtrise de soi.

Se fixer des étapes

Pour atteindre son but, encore faut-il que celui-ci soit abordable. *« C'est pourquoi il est préférable de fractionner une tâche substantielle en sous-objectifs qui seront couronnés par autant de petites récompenses intermédiaires »*, préconise Yves-Alexandre Thalmann. Une méta-analyse publiée en 2016 dans *Personality and Social Psychology Bulletin* a mis en évidence que les récompenses immédiates sont plus fortement associées à la persistance réelle d'un objectif à long terme. En outre, quantifier l'objectif permet de suivre sa progression et donc de maintenir ses efforts, voire d'ajuster la stratégie en cas de besoin. Les *feed-back* de ses proches ou de professionnels seront autant de moyens de savoir où nous en sommes et donc de soutenir notre motivation. Encore faut-il que ces avis soient positifs, car nombre d'études dans le domaine de l'éducation montrent qu'ils sont moins efficaces lorsqu'ils sont négatifs. Quant aux retours par l'intermédiaire d'objets connectés, ils peuvent doper notre motivation. Selon une méta-analyse publiée en 2020, les porteurs de bracelets connectés parviennent à augmenter significativement leur nombre de pas quotidiens. *« Le fait de se fixer des objectifs ou de noter ses progrès dans un journal de bord a un impact majeur »*, concluaient les auteurs.

GETTY IMAGES

Préparer ses affaires la veille d'une séance de sport permet d'instaurer une routine et économise la prise de décision.

Mettre en place des routines

Pour que la balance entre désirs immédiats et objectifs à plus long terme penche du bon côté, se créer des habitudes présente de nombreux avantages. Les routines offrent une structure fixe au cerveau, qui lui évite en principe d'avoir à calculer le coût/bénéfice pour choisir entre, par exemple, regarder sa série préférée tout de suite et aller courir pour garder la forme. Il s'économise ainsi une prise de décision. Or, des travaux ont montré que plus nous prenons de décisions, plus notre maîtrise de soi s'émousse. Les routines permettent ainsi de s'économiser émotionnellement.
Par exemple, pour instaurer un jogging matinal une à deux fois par semaine, sortir ses chaussures de sport la veille jouera le rôle de rappel. Cette routine devrait s'inscrire peu à peu dans le cerveau, qui, on le sait, aime fonctionner en mode automatique pour s'économiser. Instaurer un rituel avant une action exigeant du *self-control* peut aussi s'avérer efficace. Des chercheurs de l'université Harvard (États-Unis) ont mené l'expérience chez des jeunes femmes cherchant à perdre du poids. Celles qui effectuaient un rituel (en trois étapes : couper la nourriture, la disposer de manière symétrique dans l'assiette puis appuyer trois fois dessus avec la fourchette) consommaient moins de calories (1424 calories par jour, en moyenne) que celles qui ont simplement fait attention à leur alimentation.

Anticiper les obstacles

Faire un travail de visualisation de l'objectif, ainsi que des grains de sable qui ne manqueront pas d'apparaître, aide à mobiliser l'énergie nécessaire pour accomplir notre tâche. Comme l'a montrée Gabriele Oettingen, professeure de psychologie à l'université de New York (États-Unis), une visualisation positive déclenche un sentiment de relaxation qui accompagne normalement les résultats réels, plutôt que de mobiliser l'énergie nécessaire pour l'obtenir. Dans le même ordre d'idées, inutile d'ignorer les émotions négatives que la recherche du contrôle de soi peut générer. *« L'étiquetage de l'affect, c'est-à-dire la mise en mots des sentiments, réduit l'incertitude, apaise »*, indique Yves-Alexandre Thalmann. Plus les mots seront bien choisis, plus ce que les psychologues nomment la granularité émotionnelle sera fin, et plus nous resterons maîtres de nous-mêmes. Si cette verbalisation est difficile, elle peut se faire dans le cadre d'une thérapie cognitivo-comportementale ou en passant par l'écrit.

Soigner son hygiène de vie

Une activité physique régulière, un sommeil de qualité, une consommation modérée d'alcool…, ces incontournables de la santé présentent aussi l'avantage d'être régulateurs d'émotions, et donc de rendre moins impulsif. Comment ? Le sport fait grimper le taux d'endorphines, qui ont des propriétés ▶

euphorisantes ; il favoriserait aussi la synthèse de sérotonine, qui régule l'humeur. Un atout lorsqu'il s'agit de faire le bon choix pour ne pas succomber au piège du présent. Quant au manque de sommeil, la fatigue cérébrale induite grignote plusieurs fondamentaux du contrôle de soi : capacité à inhiber les pensées négatives, à résister à des tâches difficiles, à se concentrer… Même les bonnes habitudes alimentaires sont particulièrement fragilisées par les dettes de sommeil. Ces dernières modifient en effet la concentration d'hormones informant le cerveau sur nos besoins énergétiques. Une mauvaise information conduisant à une mauvaise décision… et donc à du grignotage de produits gras et sucrés.

TOBY MELVILLE/REUTERS

Entraînement physique, respiration et méditation permettent à ces moines de ressentir peu ou pas du tout la douleur.

MOINES SHAOLIN

Une maîtrise aiguisée de la douleur

Les moines Shaolin ne sont pas atteints d'une insensibilité congénitale à la douleur. Pourtant, ils n'éprouvent aucune souffrance lorsqu'ils marchent sur des lames acérées ou cassent des briques à mains nues. Des médecins anesthésistes ou encore des spécialistes de la biomécanique attribuent ces capacités à trois types de qualités développées : le physique, le mental et le spirituel. L'entraînement physique de ces moines, qui forment aussi l'élite chinoise du kung-fu Shaolin, permet de renforcer les os et les muscles ainsi que d'assouplir les tendons. L'os se forme et se résorbe en fonction des contraintes mécaniques qu'il subit. Des chocs répétés créent des microlésions qui obligent l'os à aller chercher du calcium pour se réparer. Les moines savent aussi que répartir le poids du corps sur une arme tranchante diminue la douleur. C'est le principe de la planche à clous du fakir. Côté mental, tout repose sur le « qi », l'énergie vitale centrale dans la médecine traditionnelle chinoise que les moines maîtrisent grâce à la respiration. Les examens de neuro-imagerie montrent que ces exercices de respiration améliorent la concentration et la relaxation. Quant à la méditation, il est prouvé qu'elle peut diminuer les signaux nerveux de la douleur.

Proclamer son objectif

Soutien ou pression sociale… Le fait de rendre public son engagement aide à le respecter. Pour cela, il existe des sites appelés des « boutiques d'engagement ». L'analyse de 125 000 bonnes résolutions sur la plus célèbre de ces boutiques virtuelles, www.stickk.com, créée au sein de l'université Yale (États-Unis), montre que le taux de réussite à six mois d'un engagement proclamé est de 22 % ; il grimpe à 51 % si la personne a désigné un arbitre qui vérifie la véracité des progrès… et atteint 63 % s'il y a en plus un enjeu financier (une somme à verser en cas d'échec). Le cerveau a vite fait de calculer le rapport coût/bénéfice ! D'autant que nous savons, grâce au psychologue Daniel Kahneman, prix Nobel d'économie, que la douleur de perdre est psychologiquement deux fois plus forte que le plaisir de gagner.

Examiner la situation sous un angle plus positif

Voir le bon côté des choses ? Facile à dire ! Pour transformer l'essai, la recherche en psychologie a élaboré le principe du « groupement de tentations ». Autrement dit, associer une activité plaisante — regarder une série — et une autre qui requiert plus d'effort comme pratiquer une activité physique. Ce duo maximise les chances de tenir ses bonnes résolutions. Démonstration faite à l'université de Pennsylvanie (États-Unis) par Katherine Milkman, présidente de la Society for Judgment and Decision Making, auprès de 6000 personnes inscrites dans une salle de sport. Celles qui avaient reçu un livre audio à écouter pendant leur séance augmentaient de 14 % la probabilité de se tenir à leur entraînement hebdomadaire.
Formuler son engagement de façon positive n'est pas neutre non plus. Des chercheurs de l'institut Karolinska (Suède) ont montré, dans une étude publiée en 2020 dans *Plos One*, que *« les per-*

SHUTTERSTOCK

L'objectif de moins utiliser son smartphone est plus facilement atteint si on se focalise sur une autre activité.

Méditation et hypnose aident à accepter ses émotions

Ne pas se soumettre à la tentation : la technique est imparable quand il s'agit de résister à un plaisir matériel. Lorsque ce sont les émotions qui échappent au contrôle de soi, mieux vaut privilégier les stratégies cognitives telles que la méditation.

sonnes dont les objectifs se traduisaient par un gain étaient nettement plus performantes que celles dont les objectifs étaient axés sur l'évitement ». Au lieu de se promettre de réduire le temps passé sur les réseaux sociaux, il est préférable de se fixer comme objectif de laisser son téléphone au placard pour se remettre au piano… Autre technique possible : revisiter sa vie en construisant un récit dont on est le héros. Un héros qui a traversé des épreuves mais les a surmontées. Le psychologue américain Dan McAdams a été le premier à théoriser le concept de « psychologie narrative » au début des années 1980. Depuis, des études ont établi une corrélation entre les histoires bien ficelées, comportant plus d'éléments de rédemption, et un sentiment de bien-être ainsi qu'une capacité à se projeter dans l'avenir.

Évidemment, aucune méthode n'est miraculeuse. À chacun sa stratégie. Reste une piste à explorer : faire confiance à ses propres automatismes. Ils peuvent servir à effectuer des tâches complexes qui procurent un profond sentiment de bien-être. Cet état, appelé le *flow*, est atteint lorsque l'on pratique une activité que l'on maîtrise parfaitement, où la concentration est à son maximum, où la notion de temps s'efface *(lire p. 58)*. Du puzzle à la cuisine en passant par le sport, le *flow* se combine à toutes les sauces. ■ **C. C.**

Le psychiatre Christophe André, qui a introduit la méditation de pleine conscience dans les hôpitaux français en 2004, prévenait quelques années plus tard : « *La méditation est bien plus efficace que cela ne pourrait le paraître aux esprits pressés ou désireux de se "contrôler".* » Serait-il possible de se maîtriser sans faire appel à sa volonté ? En fait, quand les émotions négatives nous submergent et sont donc inadaptées, deux chemins s'offrent à nous : les refouler ou les accueillir. La méditation de pleine conscience invite à opter pour la seconde stratégie, les observer sans les juger. Cette « gymnastique » a démontré qu'elle était associée à une baisse de la fréquence et de l'intensité des émotions négatives, à une diminution des troubles anxieux et à une capacité à développer des affects positifs. Pratiquée de manière assidue, la méditation de pleine conscience favoriserait en effet l'épaississement du cortex préfrontal gauche — une zone impliquée dans les processus cognitifs et émotionnels — et donc un fonctionnement plus optimal de celui-ci. Ces modifications structurelles sont en fait des marqueurs d'amélioration du contrôle exécutif et de résistance au stress. Résultat : il est aujourd'hui établi qu'une pratique régulière de la méditation fait jeu égal avec des traitements antidépresseurs dans les récidives de dépression. Or, un état dépressif se caractérise par le ▸

SIPA

« La méditation est bien plus efficace que cela ne pourrait le paraître aux esprits pressés ou désireux de se "contrôler" »

Christophe André, psychiatre

sentiment d'avoir perdu le contrôle et d'être incapable de prendre la moindre décision. La dernière étude, publiée dans *Jama Psychiatry* en novembre 2022, parvenait à la conclusion que les thérapies de réduction du stress basées sur la méditation de pleine conscience devraient être remboursées.

Des résultats moins convaincants pour l'hypnose

Autre atout pour les impulsifs : l'acceptation de ses émotions améliore l'attention, une capacité centrale dans le contrôle de soi. Dès le début des années 2000, les électroencéphalogrammes (EEG) réalisés chez le célèbre moine bouddhiste Matthieu Ricard ont révélé au grand jour une plus grande activité des ondes gamma, qui dopent la concentration. Selon Rimma Teper, chercheuse à l'université de Toronto (Canada) et coauteure de l'ouvrage *How Mindfulness Enhances Self-Control* (« Comment la pleine conscience améliore le contrôle de soi »), tous ces effets de la pleine conscience nous permettent de *« cultiver une acceptation des expériences momentanées sans laisser une séquence de sensations, d'émotions, de souvenirs ou de pensées dominer le champ expérientiel »*. Autrement dit, les affects ne sont pas niés, bien au contraire, puisqu'ils servent à *« dynamiser les processus de contrôle au service d'un comportement orienté vers un objectif »*. Mais à quel rythme faut-il méditer pour espérer obtenir de tels résultats ? L'assiduité dope les effets, mais des neuroscientifiques de l'université Harvard (États-Unis) ont observé que huit séances de méditation entraînaient déjà une augmentation de la taille de l'hippocampe, région impliquée dans la mémoire et la régulation des émotions. Chez les dépressifs, l'hippocampe a tendance à diminuer.

UW-MADISON UNIVERSITY COMMUNICATIONS

L'IRM cérébrale montre chez les pratiquants de la méditation une augmentation de l'hippocampe (ici celle du moine bouddhiste Matthieu Ricard).

Quant à l'hypnose, les preuves de son impact sur le contrôle de soi sont moins flagrantes. Et cette pratique reste mystérieuse. Comme l'indiquait l'Inserm en 2015 dans son expertise scientifique, *« les résultats issus des études ont permis d'objectiver des modifications du fonctionnement cérébral en lien avec la transe hypnotique, mais ils ne permettent pas encore d'expliquer complètement le phénomène »*. Cependant, l'hypnose est un état de conscience modifié — comme la médiation — où l'on observe une baisse d'activité dans certaines zones du cerveau (impliquées dans les fonctions cognitives, la prise de décision ou encore la perception de la douleur) et une augmentation de la connectivité entre d'autres régions. Ainsi, durant une séance, la prise de conscience de certaines informations serait bloquée, laissant toute la place aux suggestions de l'hypnotiseur. Les pensées parasites sont de cette façon court-circuitées, ce qui favorise un état de relaxation. Le thérapeute peut alors formuler des suggestions positives. Les coachs sportifs sont d'ailleurs de plus en plus nombreux à recourir à l'hypnose dans le cadre de la préparation mentale des athlètes.

Résistance au stress, amélioration de la technique en automatisant de nouveaux schémas mentaux, restauration de l'énergie… Les attentes concernant les bienfaits de l'hypnose sont nombreuses, mais force est de constater que les résultats ne sont pas vraiment au rendez-vous. Une étude publiée dans *Frontiers* en janvier 2022 conclut qu'*« il existe peu de recherches empiriques rigoureuses sur le plan méthodologique pour établir sa valeur, et il manque encore de nombreuses preuves expérimentales pour prouver son mécanisme. »* Dans le sevrage tabagique par exemple, la revue Cochrane n'est pas plus convaincue : *« Il n'y a pas suffisamment de preuves pour déterminer si l'hypnothérapie est plus efficace que d'autres formes de soutien comportemental ou d'arrêt sans aide. »* ■

C. C. @cecilecoumau

ESSAI CLINIQUE

La piste de la stimulation électrique

Ce n'est encore qu'une voie de recherche, mais elle semble prometteuse : recourir à une méthode invasive quand le déficit de maîtrise de soi est majeur, comme en cas d'anxiété sévère ou de dépression. Des chercheurs de l'université du Minnesota (États-Unis) ont ainsi mené avec succès un essai dans lequel une stimulation électrique du cerveau était couplée à une intelligence artificielle. Tout d'abord, un algorithme repère le moment où un patient éprouve des difficultés à effectuer une tâche de contrôle cognitif, autrement dit à passer d'un schéma de pensée ou d'un comportement à un autre. Puis, de petites quantités d'énergie électrique sont envoyées dans une zone cérébrale, la capsule interne, identifiée comme étant responsable du contrôle cognitif. *« L'analogie que j'utilise souvent est celle d'un vélo électrique*, explique Alik Widge, coauteur de l'étude. *Lorsque quelqu'un pédale mais éprouve des difficultés, le vélo le détecte et augmente l'assistance. Nous avons créé l'équivalent de cela pour la fonction mentale humaine. »*

LES INDISPENSABLES

LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR

CAHIER PRATIQUE
« Arroser, pailler, bouturer…
les conseils des chercheurs »

La science au service des JARDINS

Un potager adapté au réchauffement climatique

Jardiner, un atout pour la santé

Vers, insectes… les travailleurs de l'ombre

Faire de son balcon un îlot de verdure

MARC-ANDRÉ SELOSSE Biologiste
DAMIEN DEKARZ Jardinier, youtubeur

« **La permaculture**, c'est l'art de créer un écosystème durable en s'inspirant de la nature »

GETTY IMAGES ; QUENTIN HOUDAS/LEXTRA ; FLORE AVRAM

en vente en kiosque

Soigner la dépression par l'assiette

La psychonutrition s'intéresse aux connexions ténues entre ce que nous mangeons et le bien-être psychique. Avec pour perspectives de prévenir certains troubles fréquents comme la dépression et de proposer une nouvelle approche thérapeutique dans les maladies mentales.

LES ALIMENTS ANTIDÉPRIME

SHUTTERSTOCK/DIONISVERA

	FRUITS ET LÉGUMES	LÉGUMES À FEUILLES	CÉRÉALES COMPLÈTES	LÉGUMES SECS
QUANTITÉS	5 portions (80 à 120 g chacune) d'au moins 2 fruits et 3 légumes par jour	Aussi souvent que possible	Au moins une portion de 150 g cuite par jour	Au moins deux portions de 150 g cuites par semaine
APPORTS	Fibres solubles et insolubles	Acide folique (ou vitamine B9)	Fibres, magnésium et vitamine B9	Fibres, magnésium et vitamine B9
BIENFAITS	Nourrissent les bactéries du microbiote intestinal	Module la synthèse de la sérotonine, impliquée dans la régulation de l'humeur	Participent à la bonne santé du microbiote et à la production de sérotonine	

SHUTTERSTOCK/M.MAINKA - SHUTTERSTOCK/SCHWEITZER - SHUTTERSTOCK/DIONISVERA

Soigner les maladies mentales par le ventre, l'idée fait son chemin. De plus en plus d'études montrent une influence probante du contenu de notre assiette sur la régulation de nos émotions, notre humeur et, plus encore, sur la survenue de troubles psychiques, dont la dépression, qui touche près de 350 millions de personnes dans le monde. L'enjeu est de taille car il n'existe pas de traitement parfait pour soigner cette pathologie multifactorielle qui associe facteurs génétiques et environnementaux. La littérature scientifique décrit des thérapies médicamenteuses et non médicamenteuses efficaces dans un à deux cas sur trois, et le risque de rechute après un épisode dépressif majeur est de 50 %. C'est ce constat qui a poussé Tasnime Akbaraly, chercheuse en épidémiologie nutritionnelle à l'Inserm à Montpellier (Hérault), à examiner les facteurs modifiables de la maladie, comme l'alimentation *(lire p. 69)*. Dès 2009, elle montre que suivre un régime méditerranéen — une alimentation riche en fruits et légumes, poisson et céréales complètes — diminue de 33 % le risque de symptômes dépressifs. *« À l'inverse, les personnes qui ont l'habitude de consommer beaucoup d'aliments riches en acides gras saturés (présents dans les graisses animales comme le beurre et la viande rouge), en sucre ainsi que des produits industriels raffinés (chips, sodas, pizzas, etc.) ont un risque augmenté de 60 % de souffrir de symptômes dépressifs, comparées à celles qui consomment le moins ces aliments »*, explique la chercheuse.

Un déséquilibre du microbiote intestinal en cause

Des résultats confirmés par une méta-analyse en 2018. *« Depuis, la littérature scientifique ne cesse de s'enrichir et il est désormais établi qu'une alimentation riche en fruits et légumes induit un meilleur niveau de bien-être et de santé mentale »*, précise Guillaume Fond, psychiatre, enseignant et chercheur à la fondation FondaMental et aux hôpitaux universitaires de Marseille*.

A priori, le lien entre troubles psychiques et alimentation n'a rien d'évident, mais le trait d'union entre les deux pourrait être le microbiote intestinal, composé de milliards de bactéries. *« Un régime alimentaire riche en sucres et en graisses saturées appauvrit sa composition et modifie la perméabilité de la barrière intestinale, laquelle laisse passer dans le sang des molécules et toxines qui finissent par gagner le cerveau et créer une inflammation chronique de bas grade pouvant être à l'origine d'anxiété ou de dépression, de troubles bipolaires ou de schizophrénie »*, explique Guillaume Fond. Dans certaines formes de dépression, un déséquilibre du microbiote (ou dysbiose) ferait chuter la sécrétion de sérotonine (90 % de la sérotonine est concentrée et produite dans l'intestin), un neurotransmetteur impliqué dans la régulation de l'humeur et de l'anxiété.

Dans le laboratoire Perception et Mémoire de l'Institut Pasteur installé à ▸

HUILES VÉGÉTALES	POISSONS GRAS	ALIMENTS LACTOFERMENTÉS	CHOCOLAT NOIR	FRUITS DE MER	ŒUFS, VIANDE, ABATS
2 cuillères à soupe par jour	Une fois par semaine	Une portion par jour au choix	30 g par jour	Au moins 150 g une fois par semaine	Moins de 500 g par semaine
Oméga 3	Oméga 3	Probiotiques	Magnésium et tryptophane	Magnésium, tryptophane	Tryptophane
Assurent la connectivité entre les neurones		Augmentent la diversité des bactéries intestinales	Indispensables à la production de sérotonine		

SHUTTERSTOCK/TORD4968 – SHUTTERSTOCK/A. RATHS – SHUTTERSTOCK/BAIBAZ – PIXABEY – SHUTTERSTOCK/NITO – PIXABEY

TIJANA FETERMAN

« Des travaux montrent que les oméga 3 augmentent l'efficacité des antidépresseurs »

Guillaume Fond, psychiatre, enseignant et chercheur, fondation FondaMental, hôpitaux universitaires de Marseille

Paris, Gabriel Lepousez et ses collègues de l'Inserm et du CNRS ont pour leur part constaté dans un modèle animal (la souris) qu'un état dépressif (induit dans l'expérience par un stress chronique) est associé à l'apparition d'une dysbiose du microbiote. Celle-ci conduit à une chute brutale dans le cerveau d'un neuromodulateur, les endocannabinoïdes. Fabriqués par les neurones à partir d'éléments précurseurs lipidiques apportés par l'alimentation, tel l'acide arachidonique (un oméga 6 présent dans les œufs, la viande et les abats), ils sont impliqués dans de nombreuses fonctions cérébrales, dont la régulation fine de la transmission synaptique. Mieux encore : « *Nous avons démontré par des expériences de transfert de microbiote d'un animal présentant des troubles de l'humeur à un animal en bonne santé que cet effondrement du taux d'endocannabinoïdes, induit par la dysbiose, était directement responsable de l'apparition progressive d'un état dépressif* », affirme Gabriel Lepousez. La bonne nouvelle est que ce trouble psychique était réversible. Il a suffi aux chercheurs de rétablir par supplémentation alimentaire un taux suffisant en acide arachidonique pour que les symptômes dépressifs des modèles animaux s'améliorent nettement. « *De même lorsqu'on leur a administré durant plusieurs semaines une souche de bactéries de la famille des lactobacilles,* Lactobacillus plantarum, *qui a la propriété d'améliorer l'absorption des lipides* », ajoute le chercheur.

Ces découvertes ouvrent grand la voie à de nouvelles stratégies thérapeutiques dans la prise en charge des maladies mentales : l'administration de certains nutriments ou de certaines souches de bactéries probiotiques pourrait être un levier pour rééquilibrer le microbiote intestinal et ainsi améliorer certains symptômes psychiques. Les travaux menés par Joël Doré, directeur de recherche à l'unité Microbiologie de l'alimentation au service de la santé ou Micalis (université Paris-Saclay, Inrae de Jouy-en-Josas et AgroParisTech), vont dans ce sens.

En 2022, ce spécialiste, passionné par l'écologie microbienne intestinale, a pu montrer que l'administration d'une combinaison de trois actifs alimentaires (glutamine, curcumine et probiotique) à des souris dépressives durant trois semaines était aussi efficace qu'un antidépresseur très utilisé, la clomipramine. « *La glutamine, un acide aminé présent dans les céréales et les légumineuses, protège l'intégrité de la paroi intestinale ; la curcumine est un dérivé du curcuma, une épice aux propriétés anti-inflammatoires et antioxydantes ; et la souche probiotique* Lactobacillus rhamnosus GG *est une souche anti-inflammatoire qui a, de plus, la faculté de produire du Gaba, un précurseur de la sérotonine* », détaille Joël Doré, également directeur scientifique du centre d'excellence en analyse du microbiome MétaGénoPolis.

En septembre 2022 a été lancé un projet de recherche clinique baptisé Promood, mené au sein de la fondation FondaMental avec la start-up Gynov et l'Inrae. Objectif : tester l'efficacité de cette polymicrobiothérapie, combinée à un antidépresseur (la venlafaxine) chez des patients résistants à une première ligne de traitement.

SHUTTERSTOCK BEATS1

NEUROLOGIE

Le régime Mind contre le déclin cognitif

Mis au point par l'épidémiologiste Martha Clare Morris, de la Rush University Medical Center de Chicago (États-Unis), le régime Mind combine les bienfaits du régime méditerranéen à ceux du menu Dash, pauvre en sel et en graisses saturées. L'adopter infléchirait de 53 % l'éventualité de développer la maladie d'Alzheimer par rapport aux « pratiquants » les moins sérieux. Une nouvelle étude américaine publiée en 2021 indique que ce régime est associé à de meilleures fonctions cognitives même lorsque des dépôts de protéines amyloïdes se sont développés dans le cerveau.

Quatre centres participent au projet (Besançon, Bordeaux, Clermont-Ferrand et Créteil). Les résultats sont attendus pour 2024.
D'autres travaux sont conduits sur les oméga 3. Ces acides gras poly-insaturés essentiels, que le corps ne sait pas synthétiser (et qui doivent donc être apportés chaque jour par l'alimentation), sont des constituants majeurs de la membrane des cellules cérébrales. *« L'un d'eux, le DHA (acide docosahéxaénoïque), est un composant essentiel des neurones et des astrocytes, tandis que l'EPA (acide eicosapentaénoïque) est retrouvé majoritairement dans les cellules microgliales qui entourent les neurones. Or, plus les cellules cérébrales sont riches en oméga 3, plus leur membrane est fluide — ce qui permet d'assurer de multiples fonctions dont le transport des neurotransmetteurs comme le glutamate —, et plus la connectivité est bonne entre les neurones »*, explique Sophie Layé, neurobiologiste. Les recherches qu'elle pilote au laboratoire NutriNeuro de l'Inrae à Bordeaux (Gironde) ont prouvé qu'il existe un lien fort entre les oméga 3, les fonctions cognitives et notre état mental.

Des recommandations à suivre tout au long de la vie

Une carence en acides gras poly-insaturés aurait ainsi des conséquences directes sur la santé mentale, notamment si elle débute tôt dans la vie. *« Les souris adultes dont la mère n'a pas consommé assez d'oméga 3 pendant la grossesse présentent des altérations de la mémoire »*, explique Sophie Layé. Si la carence alimentaire intervient plus tardivement, après le sevrage — ce qui correspond pour l'humain à l'adolescence —, les animaux sont plus enclins, une fois adultes, à développer des troubles anxieux et dépressifs. *« Ils seront aussi plus sensibles à présenter des troubles cognitifs s'ils sont confrontés à des événements stressants au cours de leur vie »*, précise la chercheuse.

TASNIME AKBARALY.

VERBATIM

TASNIME AKBARALY

CHERCHEUSE À L'INSERM ET MEMBRE DE L'INTERNATIONAL SOCIETY FOR NUTRITIONAL PSYCHIATRY RESEARCH (ISNPR)

« Intégrer une approche nutritionnelle en psychiatrie »

“La littérature scientifique met clairement en évidence une relation entre alimentation et troubles psychiques. Il faudrait désormais intégrer une approche nutritionnelle dans la prise en charge des maladies mentales, comme c'est déjà le cas en médecine générale pour les patients à risque de pathologies cardio-métaboliques telles que le diabète de type 2 ou les maladies cardiovasculaires. Une alimentation adaptée sur le modèle méditerranéen avec des propriétés anti-inflammatoires pourrait constituer une stratégie de prévention supplémentaire pour diminuer le risque de troubles dépressifs. L'un des objectifs est également de publier des recommandations nutritionnelles fondées sur l'ensemble des travaux actuels en psychonutrition et qui puissent être intégrées à la pratique clinique en psychiatrie et en médecine générale. ”

Suivre les recommandations nutritionnelles tout au long de l'existence permet de maintenir des taux satisfaisants en oméga 3 (250 mg d'EPA et 250 mg de DHA par jour) : consommer chaque jour deux cuillères à soupe d'huiles végétales (lin, colza, noix), des noix, de la mâche, des graines de lin et, une fois par semaine, des poissons gras particulièrement bien fournis en EPA et DHA comme les sardines, le saumon, le thon, le hareng et le maquereau. *« Il est quand même recommandé aux femmes enceintes et allaitantes de consommer 200 mg de DHA par jour en plus de l'apport recommandé pour les adultes »*, fait remarquer Guillaume Fond.
Mais ces recommandations suffisent-elles vraiment une fois des troubles psychiques déjà installés ? *« Dans certains cas, oui, comme des dépressions inflammatoires ou survenant dans les cas d'obésité,* répond Guillaume Fond. *Et la recherche est prometteuse. Des travaux montrent que les oméga 3 augmentent l'efficacité des antidépresseurs, surtout dans les formes les plus sévères de la dépression, à raison de 2 g par jour dont au moins 1 g d'EPA. Les oméga 3 DHA semblent aussi efficaces pour soulager les troubles anxieux, avec un apport de 400 mg par jour. Toutefois, il faut le plus souvent une supplémentation pour apporter ces doses requises »*. Ces données sont si encourageantes que la Fédération mondiale des sociétés de psychiatrie biologique (WFSBP) et le Réseau canadien pour les troubles de l'humeur et l'anxiété (Canmat) ont publié en 2022 dans le *World Journal of Biological Psychiatry* une liste de recommandations (posologie, indications) sur des nutraceutiques (zinc, vitamine D, folate, etc.), dont la prescription de gélules d'oméga 3 comme traitement adjuvant de la dépression. Une première base pour que la psychiatrie nutritionnelle soit enfin partie prenante de la pratique clinique. ■

Sylvie Boistard @syboistard

* Auteur de *Bien manger pour ne plus déprimer,* éditions Odile Jacob, 2022.

Une micropompe contre les maladies de la lymphe

Bien moins connue que le sang, la lymphe est l'autre élément liquide qui parcourt notre corps. Mais quand la circulation se bloque, elle forme un œdème et stagne dans un membre. Pour combattre ce « syndrome du gros bras », une start-up suisse développe une pompe à implanter sous la peau.

Première médicale de l'autre côté des Alpes. C'est ici, à Lausanne (Suisse), dans le service de lymphologie du Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV), que s'est déroulé pendant deux mois le tout premier essai clinique, Lymphopilot, visant ce que l'on appelle communément le « syndrome du gros bras » ou, plus scientifiquement, le lymphœdème (ici, du membre supérieur). Après des tests positifs menés chez l'animal, la start-up helvète Lymphatica MedTech a conçu une micropompe implantable sous la peau et démarré un essai pionnier chez l'humain.

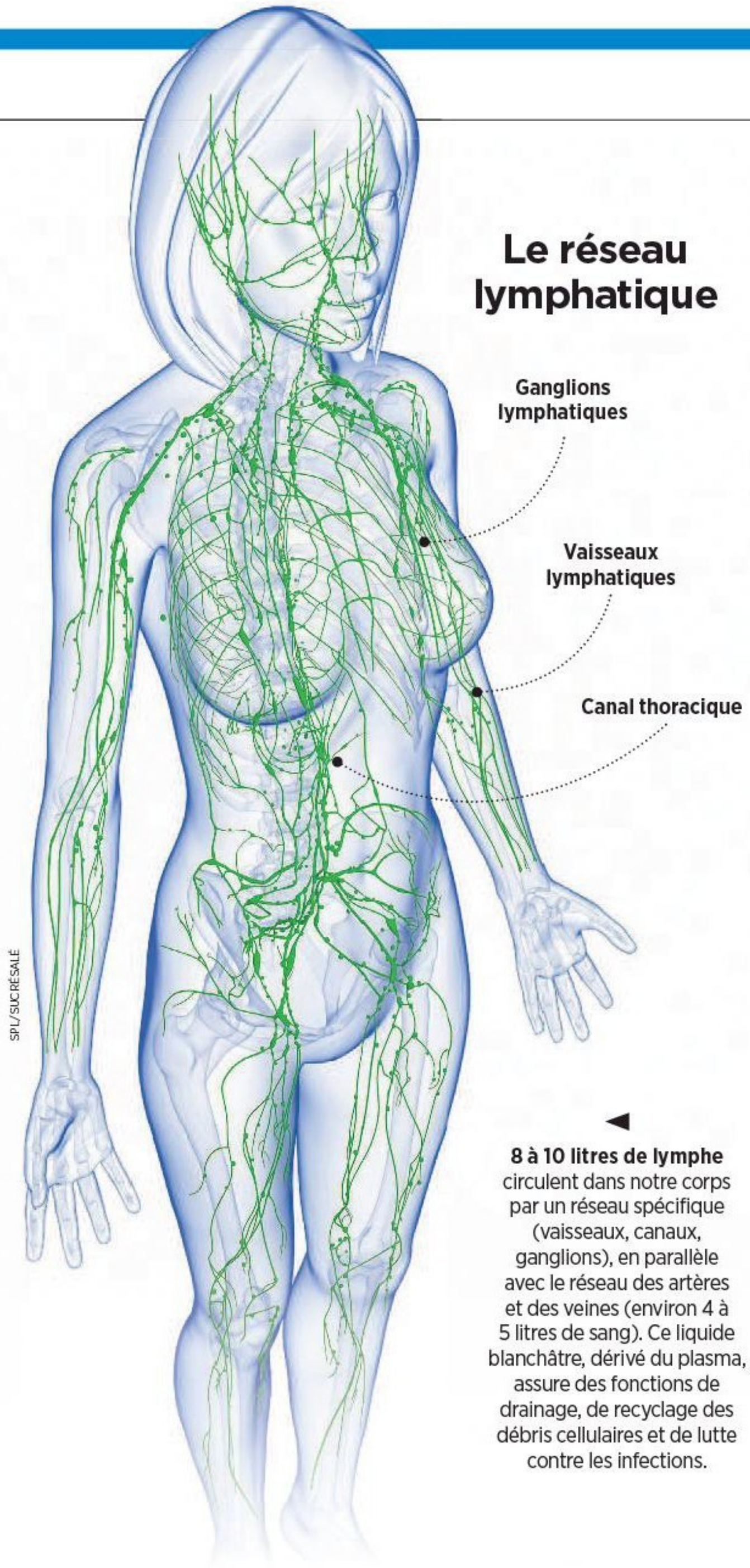
« *Les dix personnes incluses dans ce premier essai sont toutes des femmes ayant développé cette complication après une chirurgie pour cancer du sein* », précise sa coordinatrice, la Pr Lucia Mazzolai, cheffe du service d'angiologie au CHUV. Bienvenue dans le monde encore mal connu de la lymphe (du latin *lympha*, eau) et de la lymphologie. On l'oublie souvent, mais le sang n'est pas le seul élément liquide (environ 4 à 5 litres) à circuler dans notre corps. Il faut aussi compter avec les 8 à 10 litres de lymphe, un liquide blanchâtre dérivé du plasma. Ce liquide est pris en charge par un réseau spécifique — capillaires, canaux, ganglions — situé en parallèle du réseau artérioveineux. En clair, il s'agit d'un système remplissant différentes fonctions de drainage, de recyclage des débris cellulaires et de lutte contre les infections.

200 000
personnes environ sont atteintes de lymphœdème en France.

La lymphologie prend essentiellement en charge des personnes dont le bras, la jambe ou d'autres zones ont gonflé, mesurant jusqu'à 20 cm de plus que le membre sain. Indolores mais parfois très gênants, ces œdèmes sont une source de handicap quotidien. En principe, des soins journaliers — bandages et massages — permettent de faciliter leur résorption. Mais, dans certains cas, la circulation lymphatique se bloque. La cause du lymphœdème est soit « primaire » — une maladie génétique rare, avec un cas sur 10 000 —, soit, plus fréquemment, « secondaire », lorsque, après une opération d'un cancer (sein, utérus, ovaire, mélanome…), le chirurgien doit par sécurité retirer les ganglions lymphatiques les plus proches de la tumeur.

On estime ainsi que la fréquence de survenue d'un lymphœdème varie de 5 % à 30 % chez les femmes opérées d'un cancer du sein, et touche au total plus de 200 000 personnes en France. Quelle que soit la cause, le membre se retrouve toujours gonflé, constitué de liquide — la lymphe —, mais aussi de nombreuses cellules graisseuses, comme l'ont montré de récents travaux d'imagerie par résonance magnétique.

Or, une fois la maladie installée, on ne



SPL/SUCRÉSALÉ

8 à 10 litres de lymphe circulent dans notre corps par un réseau spécifique (vaisseaux, canaux, ganglions), en parallèle avec le réseau des artères et des veines (environ 4 à 5 litres de sang). Ce liquide blanchâtre, dérivé du plasma, assure des fonctions de drainage, de recyclage des débris cellulaires et de lutte contre les infections.

Le réseau lymphatique

dispose d'aucun traitement curatif, excepté des bandages plus ou moins compressifs, qui permettent de réduire le volume des œdèmes en exerçant une pression externe mécanique, et de drainer l'excès de liquide vers des zones saines. Car avec le réseau lymphatique, *« pas de pompe, comme avec le cœur »*, rappelle Lucia Mazzolai. La circulation normale de la lymphe provient en effet des mouvements du corps et des contractions de cellules musculaires présentes dans les parois des vaisseaux lymphatiques et des ganglions. C'est là qu'entre en jeu l'initiative suisse, qui prévoit d'agir de l'intérieur même du corps.

Un drainage de la lymphe 24 heures sur 24

Les deux ingénieurs Valentina Triacca et Marco Pisano, cofondateurs de la start-up Lymphatica, un ancien spin-off de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et du CHUV, ont développé pendant leur doctorat un dispositif original, Lymphodrain. Composé d'une pompe artificielle reliée à de fins tubes de silicone, il est implanté sous la peau après anesthésie générale et a pour objectif de se substituer aux ganglions manquants. Un petit aimant situé à l'intérieur de la pompe permet l'activation constante de l'appareil, tout en étant lui-même contrôlé par une batterie externe portée par le patient autour du bras. L'ensemble fonctionne 24 heures sur 24 (une pause douche est évidemment possible). *« L'appareil est très simple d'utilisation, il m'a juste fallu apprendre à dormir sur l'autre côté »*, se souvient M., 55 ans, l'une des premières participantes, plutôt satisfaite du résultat pendant les deux mois d'essai, et surtout ravie de ne pas avoir eu besoin durant cette période de massages quotidiens, qu'elle a repris depuis. *« Pour des raisons réglementaires imposées par les autorités sanitaires suisses, l'essai n'a été autorisé que pour deux mois, le dispositif a ensuite été retiré »*, précise Lucia Mazzolai. La spécialiste, confiante dans les résultats en cours d'analyse, espère ▶

SAM CHUV

« Les attentes des patients sont immenses, confrontés à de longues errances diagnostiques »

Lucia Mazzolai, cheffe du service d'angiologie au CHUV (Suisse)

poursuivre d'autres essais auprès d'un plus grand groupe de patients dans différents centres en Europe, avec cette fois peut-être la participation de la France. « *Les besoins sont immenses,* poursuit-elle, *tout comme les attentes des patients, confrontés à de longues errances diagnostiques — plus de dix ans —, car les médecins ne s'intéressent pas vraiment à la lymphe, moins noble à leurs yeux que le cœur ou le cerveau.* »

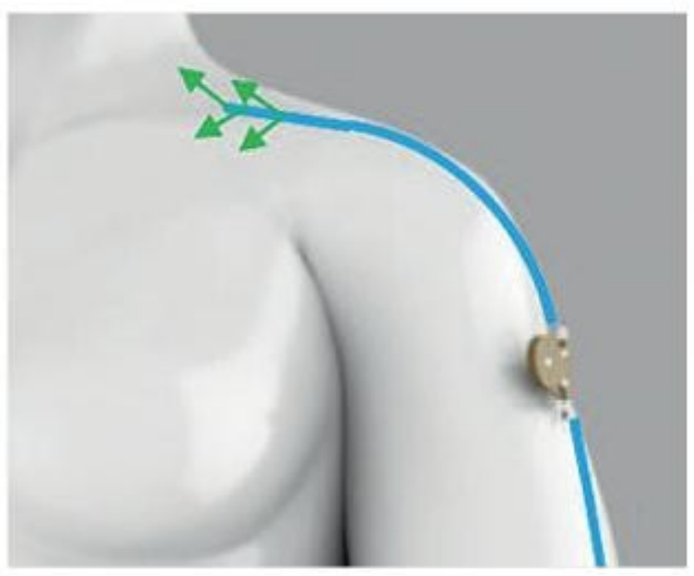
Une autre piste : bloquer la cascade inflammatoire

Un constat partagé par le Dr Stéphane Vignes, chef du service de lymphologie à l'hôpital Cognacq-Jay (Paris), l'un des rares établissements français, avec le CHU de Montpellier, à prendre en charge ces pathologies complexes dont le diagnostic est en fait surtout clinique : l'observation (modifications d'aspect et de souplesse de la peau notamment) et la palpation du gonflement sont en effet suffisamment évocatrices. Une différence de diamètre entre les bras supérieure ou égale à 2 cm peut toutefois nécessiter d'autres examens (échodoppler, lympho-IRM) voire la réalisation d'une lymphofluoroscopie, un outil d'imagerie cher et rarement disponible, qui permet d'analyser la vitesse de migration de la lymphe. « *Mais ce qu'il faut bien comprendre avec le lymphœdème, qui porte d'ailleurs très mal son nom,* précise Stéphane Vignes, *c'est le rôle du liquide en excès, mais surtout celui de l'atteinte tissulaire, liée à la fibrose* [épaississement] *de la peau et à la graisse.* » Car lorsque la lymphe stagne et s'accumule, elle active de nombreuses cellules, musculaires, graisseuses et cutanées (fibroblastes, adipocytes, kératinocytes). Ce qui, en raison de l'inflammation locale, se traduit par un épaississement vite irréversible de la peau.

C'est pour empêcher ces manifestations qu'une autre piste thérapeutique est étudiée : le blocage de la cascade inflammatoire. Une approche issue des travaux en cours du Dr Stanley Rockson de l'université Stanford, en Californie (États-Unis). Ils ont déjà démontré l'intérêt de recourir à certains anti-inflammatoires (notamment le kétoprofène), mais ont aussi permis d'identifier un potentiel biomarqueur sanguin de la maladie, le facteur plaquettaire 4 (PF4/CXCL4), afin d'obtenir un diagnostic plus précoce. « *Le lymphœdème est une maladie chronique qui, certes, ne tue pas, mais a tendance à s'aggraver si on ne fait rien* », poursuit Stéphane Vignes. D'où l'importance de le dépister le plus tôt possible pour éviter les complications. Parmi celles-ci figure l'érésypèle, une infection cutanée bactérienne dont le risque est multiplié par 70 en cas de lymphœdème.

Dans les situations les plus extrêmes — moins de 5 % des cas — il est aussi possible de recourir à la chirurgie : liposuccion ou microchirurgie avec autogreffe de ganglions. Prélevés chez les patients au niveau d'une zone saine, l'abdomen, les ganglions sont ensuite réimplantés au niveau de la zone lésée, avant de devenir fonctionnels en quelques mois. Malheureusement, aucun de ces gestes ne permet de s'affranchir de la pierre angulaire du traitement, la compression, que les patients apprennent avec le temps à effectuer eux-mêmes. ■

Sylvie Riou-Milliot



LYMPHATICA MEDTECH SA

La micropompe, implantée sous la peau, se substitue aux ganglions lymphatiques manquants (en haut). Elle est alimentée par une batterie externe (en bas).

ESSAI

La thérapie génique au secours du réseau lymphatique

Régénérer la fonction lymphatique. Tel est l'objectif de la première thérapie génique prévue pour le lymphœdème. Baptisé Theralymph, le projet sera coordonné par Barbara Garmy-Susini, directrice de recherche Inserm à l'Institut des maladies métaboliques et cardio-vasculaires (I2MC), à Toulouse, et va réunir différentes équipes européennes (Italie, Suède, Finlande, Suisse, République tchèque). Les chercheurs ont identifié une molécule, l'apeline, intervenant au niveau de la transcription du facteur de croissance de l'endothélium vasculaire (VEGF-C) pour régénérer la fonction lymphatique. Des vecteurs à ARN messager seront injectés régulièrement au niveau du bras chez une dizaine de femmes ayant développé un lymphœdème secondaire pour leur faire produire la précieuse molécule et régénérer ainsi leur système lymphatique. Démarrage de l'essai fin 2023.

POUR EN SAVOIR PLUS

- L'association Mieux vivre le lymphœdème : **sciav.fr/914avml**
- Le service lymphologie de l'hôpital Cognacq-Jay à Paris : **sciav.fr/914cognacq-jay**
- Le centre référence de lymphologie du CHU de Montpellier : **sciav.fr/914montpellier**

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

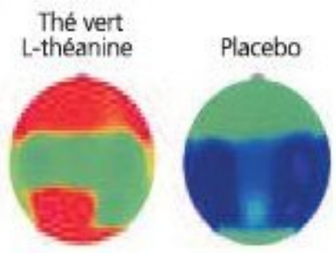
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au 01 85 50 33 12 ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 cp est disponible grâce au code **ACL 295 18 63**

Pourquoi les fibres sont si importantes

L'effet des fibres étant varié, il est important de bien diversifier sa consommation d'oléagineux, de fruits et légumes, de céréales complètes et de légumes secs.

Céréales, fruits, légumes secs… Les fibres alimentaires sont des glucides complexes présents dans les parois des végétaux qui ne sont ni digérés ni absorbés par le corps. Certaines d'entre elles sont utilisées par les industriels pour leurs propriétés gélifiantes et épaississantes dans les desserts lactés, les sauces ou les confitures. Les Français n'en consomment en moyenne que 20 grammes par jour (1) alors que les recommandations nationales sont de 30 g/jour en raison de leurs effets bénéfiques sur la santé.

Elles sont d'une grande diversité

Les fibres comprennent, selon leur structure chimique, des polysaccharides non amylacés (cellulose, hémicellulose, pectines, gommes et mucilages, etc.) ; des oligosaccharides (fructo-, xylo- et galacto-oligosaccharides, etc.), les amidons résistants et des substances non glucidiques comme la lignine (2). Certaines de ces fibres (pectine, gommes, inuline…) sont dites solubles et sont présentes dans les fruits (pommes, poires…), les légumes (asperges, carottes, oignons, etc.), les légumineuses (pois, lentilles, etc.) et les céréales (avoine, orge, etc.). Les fibres insolubles (lignine, cellulose…) sont majoritaires dans les céréales complètes, les graines, les oléagineux, les légumes secs ainsi que la peau et les pépins des fruits et légumes.

30 g

de fibres dans la journée équivalent à environ 60 g de pain complet, une pomme, 100 g de lentilles vertes cuites, 30 g de chocolat noir à 70 %, 30 g d'amandes avec peau, 150 g de riz sauvage, 100 g d'épinards et une banane.

SOURCE: ANSES, TABLE CIQUAL.

Elles sont satiétogènes et régulent le transit

Au contact des liquides, les fibres solubles forment un gel gélatineux, qui crée du volume dans l'estomac et apporte plus facilement une sensation de satiété. Elles contribuent ainsi à diminuer le risque de surpoids et d'obésité. En retenant l'eau

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

MUCILAGE Substance végétale qui gonfle au contact de l'eau en prenant une consistance visqueuse, parfois collante, semblable à de la gélatine.

FRUCTO-OLIGOSACCHARIDES OU FOS Polysaccharides composés d'une molécule de glucose et de molécules de fructose, présents dans les oignons, artichauts, topinambours, asperges, poireaux, échalotes, salsifis, etc.

PRÉBIOTIQUES Substances dont les bactéries se nourrissent. Grâce à cette source d'énergie, elles parviennent à se multiplier, permettant ainsi d'enrichir le microbiote intestinal.

des selles, elles traitent également la diarrhée tandis que les fibres insolubles préviennent la constipation en stimulant la motricité du côlon et en augmentant la fréquence des selles. Mais consommées avec excès, les fibres insolubles peuvent aussi irriter les intestins et être à l'origine de douleurs et de ballonnements. Le mieux est alors de varier fruits et légumes crus et cuits, car la cuisson attendrit les fibres.

Elles diminuent le risque cardio-vasculaire

Les fibres solubles forment un gel qui piège les glucides et ralentit leur assimilation. Elles évitent les pics de glycémie (taux de sucre dans le sang) provoqués par la prise alimentaire, qui, s'ils sont importants et répétés, exposent à un risque accru de diabète de type 2. Les fibres diminuent également l'absorption d'une partie des graisses dont le cholestérol et les évacuent par les selles, diminuant leur taux dans le sang. Consommer au moins 25 g à 29 g de fibres réduirait de 15 à 30 % le risque de mortalité toutes causes confondues, ainsi que la mortalité cardio-vasculaire, comparativement à une faible consommation. Cela diminue également de 16 à 24 % le risque de maladie coronarienne, d'accident vasculaire cérébral et de diabète de type 2, selon une étude réalisée à l'initiative de l'Organisation mondiale de la santé (3).

Elles sont bénéfiques au microbiote intestinal

Les fibres alimentaires ont la particularité de n'être ni digérées ni absorbées et parviennent presque intactes jusqu'au côlon. Là, ces fibres prébiotiques servent de substrat aux bactéries qui, en s'en nourrissant, produisent des acides gras à chaîne courte (AGCC) dont le butyrate, doté de propriétés anti-inflammatoires. Le butyrate protégerait également contre l'expansion de bactéries pathogènes qui pourraient conduire à des maladies inflammatoires de l'intestin (MICI) (4).

Toutefois, toutes les fibres ne sont pas fermentées de façon équivalente. Par exemple, les polysaccharides solubles (pectine) et les oligosaccharides (fructo- et galacto-oligosaccharides…) sont plus rapidement fermentées par les bactéries intestinales, à l'inverse de celles insolubles, telles que la cellulose, qui le sont peu (2).

Elles protégeraient de certains cancers

La consommation des fibres est associée à une diminution du risque de cancer colorectal, avec un niveau de preuve « probable », par le Fonds mondial de recherche contre le cancer (WCRF) et l'Institut américain pour la recherche contre le cancer (AICR) (5). En France, dans le rapport d'expertise collective coordonné par l'Institut national du cancer (Inca) en 2015, le niveau de preuve avait été également qualifié de probable pour le cancer du sein. Les fibres réduiraient ainsi la sécrétion d'insuline, d'hormones et de facteurs de croissance impliqués dans la prolifération cellulaire et limiteraient, en accélérant le transit intestinal, le temps de contact entre les parois du côlon et les substances potentiellement cancérogènes (6). ■

Sylvie Boistard @syboistard

JEAN-MICHEL LECERF Chef du service de nutrition à l'Institut Pasteur de Lille *

Il faut varier les sources

« Les bactéries intestinales n'ont pas toutes le même équipement enzymatique pour fermenter les fibres. Les bifidobactéries fermentent ainsi plutôt l'inuline. De même, la diversité des fibres détermine celle du microbiote. Par exemple, les bêta-glucanes présents dans les flocons d'avoine induisent une augmentation des *Lactobacilli* et des *Bifidobacteria*. Il est donc important de varier les sources de fibres en consommant des oléagineux (une poignée de 30 g par jour), des fruits et légumes (au moins cinq portions par jour), des céréales complètes (une à deux fois par jour) et des légumes secs (deux fois par semaine). »

* Coauteur avec Nathalie Delzenne de *Microbiote intestinal et santé humaine*, Elsevier Masson, 2021.

(1) Évolution des habitudes et modes de consommation alimentaires, Inca 3, Anses, 2017.

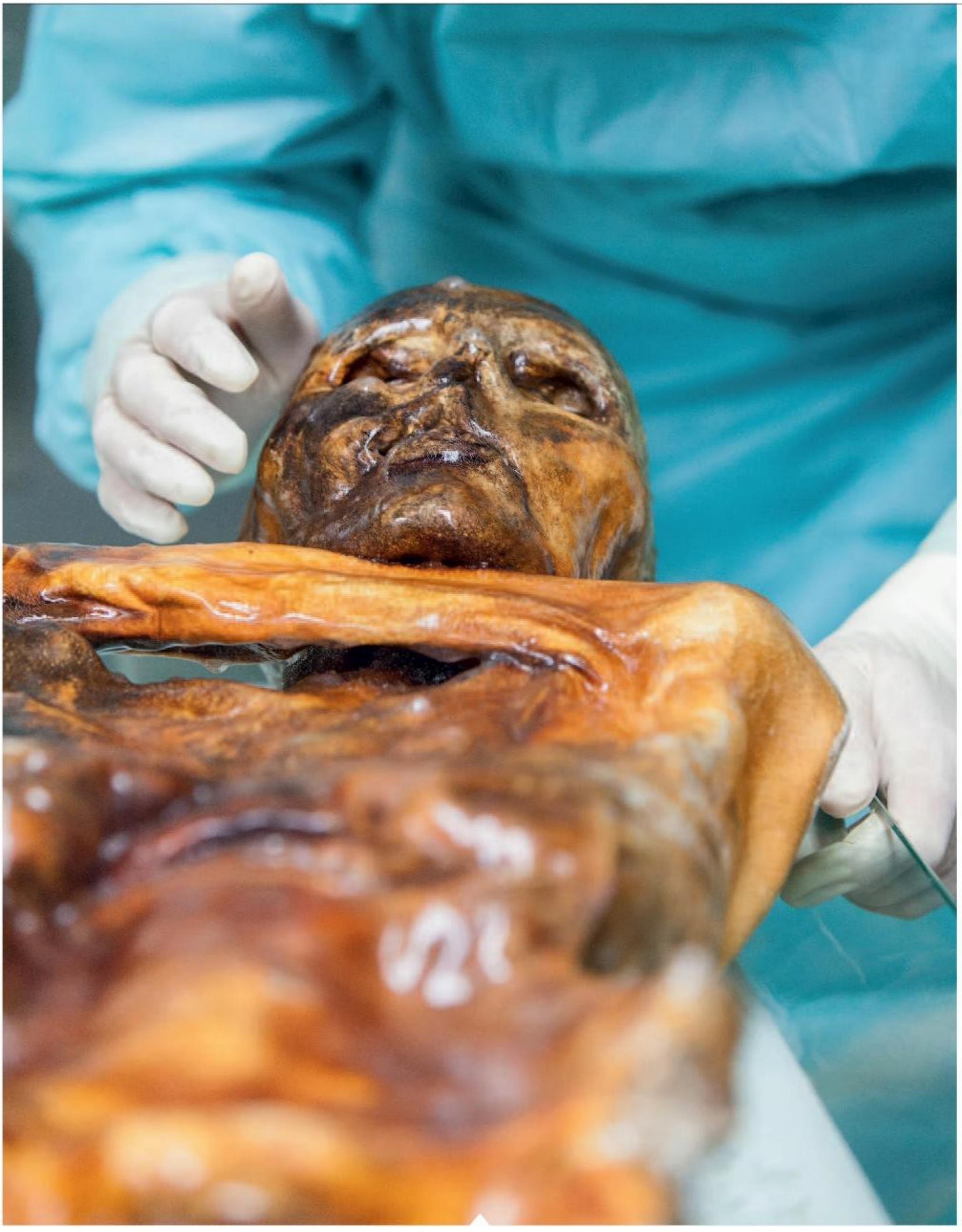
(2) « Fibres alimentaires », Champ M., *in Aliments fonctionnels dans un système alimentaire sain et durable,* Éd. Lavoisier, 2019.

(3) Carbohydrate quality and human health: a series of systematic reviews and meta-analyses, Reynolds A. et al, *The Lancet*, 2019.

(4) Microbiota-activated PPAR-γ signaling inhibits dysbiotic Enterobacteriaceae expansion, Byndloss M. et al, *Science*, 2017.

(5) Food, Nutrition, Physical Activity, and the Prevention of Cancer: A Global Perspective. World Cancer Research Fund / American Institute for Cancer Research, 2018.

(6) Nutrition et prévention primaire des cancers : actualisation des données, Institut national du Cancer, 2015.



SOUTHTYROL MUSEUM OF ARCHAEOLOGY/EURAC RESEARCH/ MARION LAFOGLER

Aujourd'hui visible au Musée archéologique du Haut-Adige à Bolzano (Italie), Ötzi continue de susciter l'intérêt des scientifiques. Une douzaine de projets de recherche sont en cours dans plusieurs domaines.

Ötzi

Le nouveau portrait de l'homme des glaces

Quelque trente ans après sa découverte sur un glacier alpin, le corps momifié vieux de 5300 ans continue de passionner et mobiliser les scientifiques. Les diverses analyses et études permettent aujourd'hui d'en savoir un peu plus sur cet homme du néolithique et sur les conditions de sa mort brutale.

Par Sylvie Briet

Arrivé intact de la préhistoire, Ötzi, l'homme des glaces tué il y a 5300 ans, a reposé dans la montagne gelé et momifié jusqu'à sa découverte en 1991. Devenu le corps archéologique le plus étudié de l'histoire, il cumule les records : plus de 800 chercheurs se sont mobilisés pour étudier le plus vieux *cold case* de l'humanité, décortiquant le moindre indice au fil de 1180 publications dans des revues scientifiques. Analyses génétiques, scans ultraperformants, paléobotanique, microbiologie tracent un portrait qui s'enrichit de plus de trente ans de progrès techniques : son dernier repas, ses dernières bagarres, ses dernières promenades, ses blessures, son équipement, son environnement… Dans la dernière publication en date, en novembre 2022 dans la revue *The Holocene*, des archéologues et glaciologues norvégiens analysent des mesures Lidar et des carottages effectués dans le secteur : la glace a bien fondu plusieurs fois et le corps s'est retrouvé à l'air libre et dans l'eau durant les périodes chaudes qui ont suivi son décès, provoquant la perte des cheveux et de l'épiderme. Mais l'état incroyable de la momie permet de retracer son histoire captivante.

1200
publications
scientifiques à ce jour sont consacrées à Ötzi.

800 scientifiques
ont effectué des recherches sur l'homme des glaces.

Lorsque, le 19 septembre 1991, un couple de randonneurs allemands découvre par hasard un corps allongé sur le ventre, émergeant d'une gangue de glace, ils pensent à un alpiniste ▸

BRUNO BOURGEOIS

DÉCOUVERTE

Une source de tensions géopolitiques

Au néolithique, Ötzi ne connaissait pas les frontières. Dès sa découverte, entre Autriche et Italie, il s'est pourtant retrouvé au cœur d'un conflit entre les deux pays. On le crut d'abord autrichien quand il n'intéressait pas encore grand monde, mais les Italiens se réveillèrent en même temps que la momie prenait de l'âge. Des géomètres établirent qu'Ötzi reposait bien côté italien, à… 92,56 mètres de la frontière ! L'homme des glaces quitta donc Innsbruck pour Bolzano, capitale de la province du même nom. Le sujet était d'autant plus sensible que cette partie des Alpes se situe dans le Haut-Adige, région autonome d'Italie germanophone. Passée d'un pays à l'autre au fil des conflits, la province fut rendue à l'Italie après la Seconde Guerre mondiale et des tensions s'y manifestent régulièrement.

mort dans un accident, loin de se douter des répercussions à venir. Dans une ravine qui l'a protégé du mouvement du glacier, l'homme est tellement bien conservé, avec la peau, les yeux, que l'on parle non pas d'un cadavre mais d'une momie. À ses côtés, reposent des vêtements et des outils. Nous sommes à 3210 mètres d'altitude, à la frontière italo-autrichienne, près des Dolomites. Les autorités autrichiennes réagissent les premières, et dépêchent sur place deux alpinistes et un médecin légiste qui a pour mission d'identifier le mort. Les images des journaux télévisés de 1991 font froid dans le dos : l'atmosphère grise et glaciale transperce l'image tandis qu'un gros plan s'attarde sur le visage encore expressif et effrayant de la momie. Mais surtout, la glace résiste et les coups de piolet qui extraient sans ménagement et sans précaution la dépouille de l'inconnu montrent combien la fouille fut bâclée. À leur décharge, les intervenants de l'époque croient encore à un accident récent. Le corps semble prêt à se désarticuler avant d'être enfermé dans un sac plastique, et envoyé à Innsbruck en Autriche, où l'archéologue Konrad Spindler pratique les premières observations. Pour lui, c'est évident, il s'agit d'un homme de la préhistoire, son équipement le prouve : une hache de cuivre, un couteau en silex, des vêtements en peau de bête…

Un instantané sur la vie au néolithique

Les événements s'emballent. Les datations carbone fixent l'âge de la momie à 5300 ans, soit 600 ans avant la plus ancienne pyramide d'Égypte ! Finis l'anonymat ou l'indifférence pour l'homme des glaces. En France, il est surnommé Hibernatus en référence au film d'Édouard Molinaro avec Louis de Funès. Plus généralement, il devient Ötzi, du nom du glacier des Alpes de l'Ötztal. Et surtout, un sujet d'étude précieux, offrant un instantané sur la vie au néolithique. L'institut médico-légal d'Innsbruck pratique la première autopsie. Mais l'Italie le réclame et, au terme d'un conflit de frontières *(lire l'encadré ci-dessus)*, obtient gain de cause : en 1998, la momie est transférée à Bolzano dans la région du Haut-Adige, où elle repose toujours dans le Musée d'archéologie *(lire l'encadré p. 80)* créé spécialement pour elle.
Ainsi Ötzi plonge-t-il dans les XXe et XXIe siècles qui se passionnent pour lui. Qui était cet homme âgé de 46 ans au moment de sa mort, chiffre respectable pour l'époque ? Il était doté d'un physique classique : 1,59 m, environ 50 kg, des cheveux bruns mi-long, des

GÉNÉTIQUE

De possibles origines corses ou sardes

Avec un patrimoine génétique exceptionnellement bien conservé, Ötzi a fait le bonheur des chercheurs. En 2012, une équipe internationale a décrypté son génome et publié les résultats dans la revue *Nature Communications*. Elle a ensuite comparé son ADN avec celui de 1300 Européens actuels. Et découvert que son chromosome Y présente une mutation rare dont la fréquence ne dépasse pas 1 % en Europe, sauf en Sardaigne du Nord où elle est de 9 %, et en Corse du Sud où elle se situe à 25 % ! C'est néanmoins avec les Sardes que les gènes d'Ötzi présentent une affinité maximale. Peut-être, cependant, la mutation génétique du chromosome Y d'Ötzi était-elle plus fréquente au néolithique qu'aujourd'hui ? Elle aurait ensuite été diluée en Europe avec l'arrivée d'autres populations tout en étant mieux préservée dans les deux îles. Les gènes d'une population insulaire sont en effet moins brassés au cours des millénaires que ceux des continentaux.

© SOUTH TYROL MUSEUM OF ARCHAEOLOGY/ WWW.ICEMAN.IT

De nombreux objets ont été collectés auprès du corps d'Ötzi, dont cette **hache en cuivre**, fabriquée en Toscane selon de récentes analyses. **Une corde** réalisée avec des tendons d'animal a été retrouvée dans son carquois. Par ailleurs, l'homme des glaces était vêtu chaudement, avec **des chausses** confectionnées en peau de chèvre et un **bonnet** en fourrure d'ours.

yeux de la même couleur, des dents du bonheur devant et une ossature correspondant à celle d'un grand marcheur, avec un haut du corps peu développé, signe qu'il le faisait peu travailler. Son équipement s'adaptait parfaitement à l'environnement : un bonnet en peau d'ours brun, une cape faite d'herbes des marais des Alpes, avec en dessous un manteau de fourrure en peau de chèvre tout comme le pantalon, tandis que les chaussures en peau de cerf étaient consolidées par des semelles en cuir d'ours avec, à l'intérieur, une couche de foin servant d'isolant thermique. Enfin, son armement s'assimile à du matériel de pointe. Deux couteaux en silex, dont l'un si affûté qu'il coupe encore, deux arcs et 14 flèches rangées dans un carquois, et surtout une hache de cuivre sophistiquée que peu de personnes détenaient à l'époque. *« D'après les dernières analyses de 2017, cette hache a été fabriquée en Toscane »*, indique Elisabeth Vallazza, directrice du musée d'Archéologie du Haut-Adige de Bolzano. *« Nous avons comparé avec d'autres haches en cuivre de la même époque en Europe et des résultats, qui seront bientôt publiés, prouvent des relations commerciales importantes au néolithique. La hache d'Ötzi montre une connaissance technique des métaux impressionnante et inattendue pour l'époque. Son équipement, coûteux et rare, s'apparente à celui d'un personnage important. Ce qui confirme qu'avec la maîtrise des métaux, une hiérarchie sociale se consolide. »* Ötzi a vécu une période de transition entre la fin du néolithique et le début de l'âge des métaux, le chalcolithique, qui mélange la pierre et le cuivre. *« Son attirail de chasse est tout simplement le plus vieux connu au monde,* poursuit Elisabeth Vallazza, *comme cette corde trouvée dans son carquois mesurant près de 2 mètres, faite à base de tendons de pattes d'un animal non identifié, soigneusement repliée et nouée. »*

Son itinéraire en partie retracé grâce à l'analyse de son intestin !

Était-il pour autant un chasseur ? ou plutôt chef de tribu ? guerrier ? chaman ? berger ? Seule certitude : Ötzi a bien passé sa vie dans le sud du Tyrol. Les pollens retrouvés sur ses vêtements, ou dans les herbes séchées qui remplissaient ses chaussures, prouvent que l'homme vivait en temps normal à moins de 1600 mètres d'altitude, c'est-à-dire dans la zone de forêt fréquentée par les cervidés. Une étude de l'université de Glasgow (Écosse) parue en 2019 dans *Plos One* permet de retracer une partie de l'itinéraire d'Ötzi à partir de différentes mousses présentes dans son intestin : durant les deux derniers jours de sa vie, il a parcouru la val-

lée à basse altitude avant de remonter à 3000 mètres. Il s'était équipé pour passer plusieurs jours en montagne avec, en plus du reste, un sac à dos à l'ossature en bois, un autre en peau de vache, un panier en écorce de bouleau contenant des braises enveloppées dans des feuilles d'érable.

Un homme aux multiples pathologies

Si le corps d'Ötzi, momifié naturellement grâce aux températures négatives, est en excellent état avec tous ses organes mous, ses protéines et son matériel génétique, en revanche, l'homme était de son vivant bien mal en point. À 46 ans, il cumulait les pathologies que l'on retrouve chez les plus de 60 ans aujourd'hui : arthrose, caries, maladie de Lyme — le premier cas connu dans l'histoire —, lésions articulaires peut être dues à une maladie dégénérative, parasites intestinaux donnant coliques et fièvres, calculs biliaires. Et aussi sans doute, des soucis cardiaques à cause d'accumulations graisseuses dans les artères ou artériosclérose. *« Le décryptage de son génome en 2012 nous a appris qu'Ötzi avait une prédisposition génétique pour cette maladie : c'est la première fois que l'on met en évidence ce caractère chez un homme du néolithique,* explique Albert Zink, directeur de l'Institut de recherche sur les momies à Bolzano, coauteur d'une grande partie des études consacrées à Ötzi. *Il est également intéressant de constater son intolérance au lactose. L'élevage du bétail commençait à se répandre en Europe au néolithique, et la capacité de digérer le lait n'était pas encore un avantage génétique pour l'espèce humaine.* »

PAUL HANNY/GAMMA-RAPHO

Après la découverte du corps momifié dans les Alpes d'Ötzal à 3210 m d'altitude le 19 septembre 1991, cinq jours s'écouleront avant de pouvoir le dégager de sa gangue de glace et le transporter à l'institut médico-légal d'Innsbruck (Autriche).

L'analyse très attendue de l'estomac en 2016 n'a pas été simple, comme le souligne Albert Zink : *« Il nous a fallu vingt ans pour le retrouver ! Il était remonté sous la cage thoracique et fut découvert par hasard en étudiant les calculs biliaires. Nous avons prélevé des échantillons du contenu, il était plein.* » Avec entre autres, une bactérie, *Helicobacter pylori*, un agent pathogène responsable d'ulcères, que l'on retrouve aujourd'hui chez la moitié de la population mondiale.

Avec toutes ces pathologies, l'homme des glaces était sans doute condamné à court terme. Mais il se soignait et se faisait soigner. Après le décryptage de son génome en 2012 *(lire l'encadré p. 78)*, les chercheurs ont étudié son microbiote intestinal. Ötzi souffrait d'un vers parasite de l'intestin (*Trichuris trichiuria*) mais il en possédait l'antidote dans une bourse en cuir : *Piptoporus betulinus*, le polypore du bouleau, un champignon aux vertus antibiotiques, contenant des huiles toxiques pour les parasites et des composants laxatifs capables d'expulser les vers. Par ailleurs, il portait sur le corps 61 tatouages : des croix et des barres parallèles, placées sur les parties douloureuses, notamment les articulations, poignets, chevilles… Certains y ont vu des points d'acupuncture, d'autres un hasard. Mais quelqu'un avait introduit de la poudre végétale dans ces tatouages. Dans une étude publiée en 2019, Albert Zink et son équipe reconsidèrent soigneusement tous les maux d'Ötzi, avec ses problèmes intestinaux et cardio-vas-

CONSERVATION

Au musée, recréer les conditions du glacier

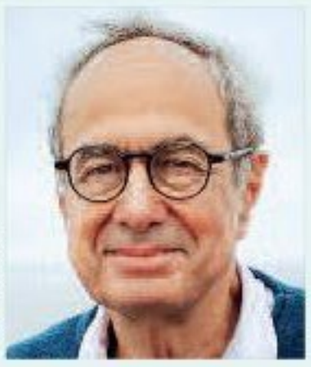
Près de 300 000 visiteurs viennent chaque année au musée de Bolzano observer l'homme des glaces à travers une petite vitre. Mais comment conserver une momie gelée dans les meilleures conditions ? C'est l'un des axes de recherche des scientifiques, qui n'ont pas encore trouvé la solution idéale. Pour le moment, Ötzi repose dans une chambre réfrigérée à -6° C et 98 % d'humidité, les conditions que lui offrait le glacier. Mais toutes les huit semaines environ, il faut vaporiser de l'eau stérile pour qu'une couche verglacée le protège et qu'il demeure humide. *« Il est sous observation 24 heures sur 24, et son état ne s'est pas modifié*, précise la directrice du musée, Elisabeth Vallazza. *Mais nous espérons développer d'ici à quelques années un système automatique d'humidification. »*

culaires, au regard de l'emplacement des tatouages et de leur nombre : *« Nous connaissons mal les traitements et les soins pour l'âge du cuivre,* conclut le chercheur, *mais Ötzi nous apprend que les plantes médicinales et les tatouages étaient utilisés pour traiter les maladies et les parasites intestinaux. »*

Son assaillant l'a probablement attaqué par surprise

Reste la question de sa mort. En 2001, dix ans après sa sortie des glaces, coup de théâtre. Un scanner révèle une pointe de flèche en silex fichée dans l'omoplate gauche. Rien ne permet alors de dire si elle a été fatale et il faut attendre six ans de plus pour établir qu'Ötzi a été assassiné. Un scanner multicoupe, beaucoup plus performant que les précédents, montre qu'une artère importante, sous-clavière gauche, a été touchée : elle porte une lacération sur 13 millimètres de long, avec un large hématome autour. Pour Frank Rühli, directeur de l'Institut de médecine évolutive à l'université de Zürich (Suisse) et coauteur de la recherche, *« la flèche tirée dans le dos a provoqué une forte hémorragie qui a entraîné la mort. Aujourd'hui encore, ces blessures sont fatales si elles ne sont pas traitées immédiatement. Nous étudions ce cas avec les méthodes de la médecine légale moderne. Nous sommes certains qu'Ötzi a été tué par derrière. Des essais avec un arc reconstitué montrent que la flèche a sans doute été tirée à 30 mètres. Il a perdu beaucoup de sang. »* Deuxième confirmation en 2012 quand les chercheurs découvrent des globules rouges intacts dans les blessures d'Ötzi. Ces globules conservent des traces de fibrine, une protéine qui apparaît après une blessure mais disparaît au début de la cicatrisation. La mort est donc intervenue rapidement après le coup porté par la flèche même si Ötzi a agonisé en se vidant de son sang.

Mais pourquoi a-t-il été tué et par qui ? Les scientifiques ne cessent de multiplier les analyses pour répondre à cette question, allant jusqu'à contacter en 2017 un vrai détective pour résoudre le *cold case*. Las! celui-ci n'a pas trouvé l'assassin. Premier constat : le vol n'est pas le mobile puisque sa précieuse hache n'a pas été dérobée. En revanche, les chercheurs ont établi que quelques jours avant sa mort, Ötzi s'était déjà bagarré ! Une entaille de 2 cm entre le pouce et l'index de la main droite montre qu'il s'est défendu mais a reçu un coup de poignard. Et cette fois, la cicatrisation avait déjà commencé, indiquant que cette blessure était antérieure à la pointe de flèche fichée dans son épaule. Ses armes portent les traces de sang de quatre personnes différentes. Pour autant, il n'était pas en train de fuir : environ dix heures avant sa mort, Ötzi a effectué un bon dernier repas riche en graisse, avec du bouquetin séché, de l'orge et du pain. Son assaillant l'a sans doute attaqué par surprise, avant de disparaître à jamais. Les raisons mystérieuses de sa mort continuent à occuper les scientifiques qui tentent également d'éclaircir d'autres énigmes comme le fonctionnement du système immunitaire d'Ötzi ou de son métabolisme, la signification exacte des tatouages. Le musée annonce une douzaine de projets de recherches en cours dans tous les domaines. ■


ANNE FOURES

VERBATIM

JEAN-PAUL DEMOULE

PROFESSEUR ÉMÉRITE DE PROTOHISTOIRE EUROPÉENNE À L'UNIVERSITÉ PARIS-I PANTHÉON-SORBONNE

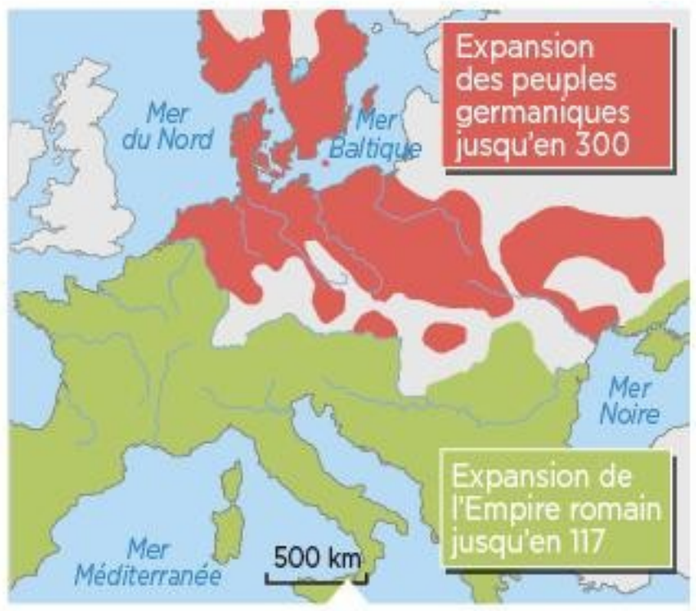
« Ötzi illustre la dimension de rêve de l'archéologie »

“Au-delà de la science, le contexte de la découverte de l'homme des glaces et l'état de la momie ont aiguisé les imaginations. C'est d'abord un miracle que des touristes l'aient vu, par hasard, à ce moment de la fonte des glaces. Le corps aurait pu se désintégrer en quelques jours. Par la suite, de nombreuses identités ont été projetées sur ce personnage que l'on prenait au début pour un chasseur de chamois avec son arc et ses flèches, avant de comprendre qu'il n'était peut-être pas sympathique. Sa mort brutale, ses armes, le sang de quatre personnes trouvées sur son poignard, illustrent la violence qui se développe au néolithique, époque où les communautés augmentent constamment à cause de l'agriculture et où les conflits s'intensifient. Par ailleurs, l'état de conservation stupéfiant d'Ötzi fascine. Même ses yeux ont été préservés. Un squelette est une vision abstraite de la mort alors qu'une momie beaucoup plus troublante évoque la personne et met mal l'aise. Elle provoque des fantasmes et des comportements pour le moins étonnants. Une noble bretonne du XVIIe siècle, Louise de Quengo, naturellement momifiée dans son cercueil, a été réinhumée car clairement identifiée : des parents très éloignés ont demandé la restitution de sa dépouille. Aujourd'hui, le British Museum de Londres (Royaume-Uni) suivi par d'autres institutions britanniques vient de décider de ne plus utiliser le mot « momie », considéré comme déshumanisant. Peut-être un jour Ötzi fera-t-il à son tour l'objet d'une demande de réinhumation…”

Une pierre gravée pourrait réécrire l'histoire des runes

Une équipe d'archéologues norvégiens a sorti d'une tombe un petit bloc de grès avec une inscription runique, le mystérieux alphabet des peuples germaniques. Sa datation repousserait de plusieurs siècles l'émergence de cette écriture.

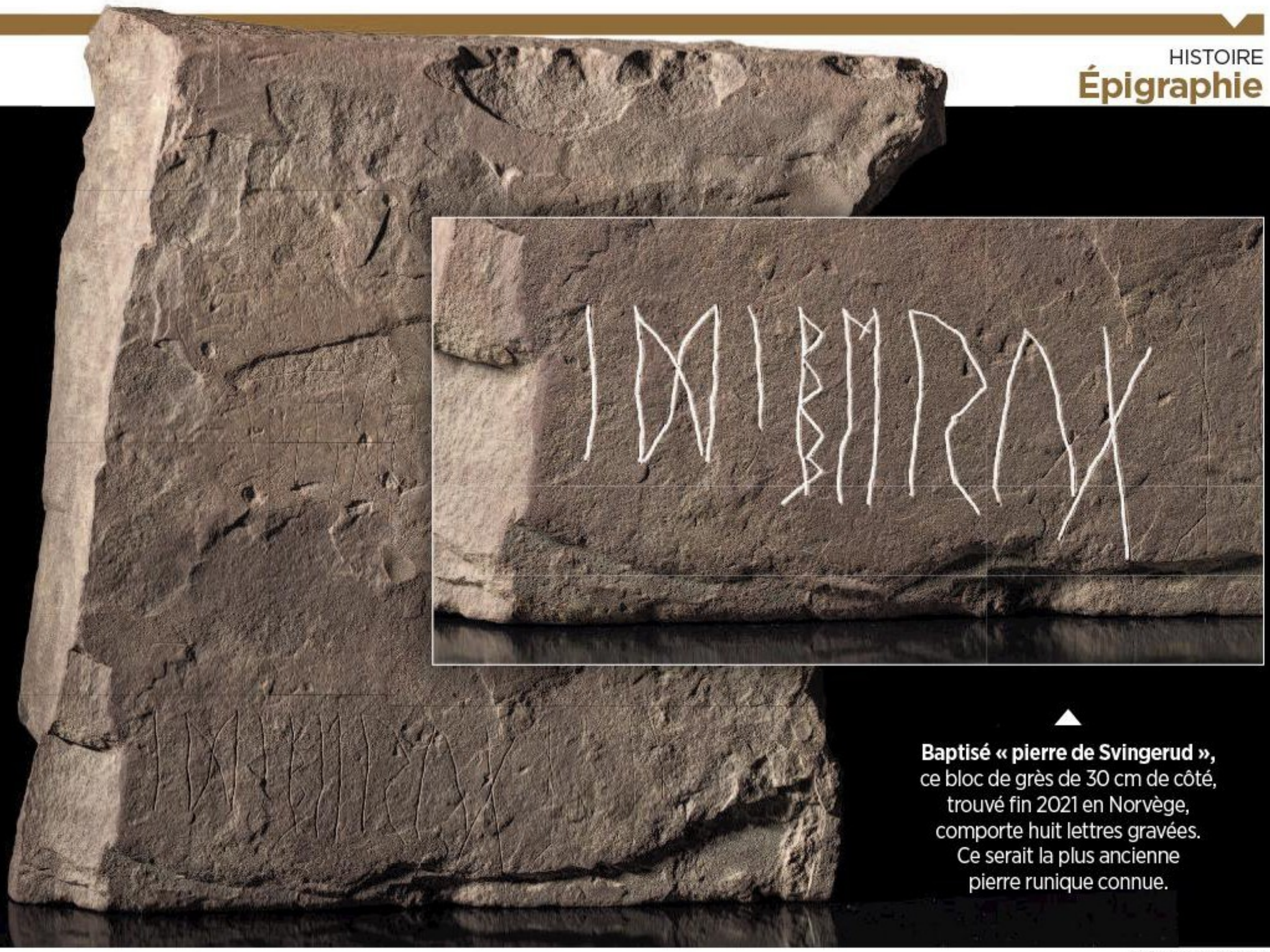
Par un vendredi pluvieux de novembre 2021, Kristel Zilmer, face à son ordinateur, met la dernière main à quelques affaires courantes avant d'entamer paisiblement son week-end. Dans sa boîte de réception vient d'arriver un nouveau courriel assorti de pièces jointes. « *Nous avons terminé la fouille d'un champ de tombes aujourd'hui. Nous y avons trouvé une pierre […] qui comporte ce que nous pensons être des runes. Il y a aussi des inscriptions sur le côté plat et le long du côté étroit. Voir les photos ci-dessous* », dit le message, écrit en norvégien par plusieurs de ses collègues du musée d'Histoire culturelle d'Oslo (Norvège). Sur les images figure un petit bloc de grès carré, d'une trentaine de centimètres de côté, aux contours irréguliers. Kristel Zilmer, runologue en chef du musée et professeure à l'université d'Oslo, n'a pas besoin de plisser les yeux longtemps pour voir qu'il s'agit de runes, dont certaines gravées plus profondément que d'autres. Des runes de l'ancien futhark (ou *fuþark*), la version la plus ancienne de l'alphabet runique, que nous savons déchiffrer et que l'on suppose apparu aux alentours du Ier siècle après J.-C. parmi les groupes germanophones d'Europe *(voir la carte ci-dessus)*. La chercheuse, intriguée, demande plus de précisions sur le contexte de la découverte de cette pierre. On lui apprend que celle-ci a été trouvée à Svingerud, au sud-est de la Norvège, lors de fouilles préventives à l'occasion de la construction d'une route ; qu'elle gisait à l'intérieur d'une fosse de crémation intégrée à un champ de tombes de l'âge du fer (800 avant J.-C.-Ier siècle après J.-C.) ; qu'elle accompagnait, enfin, les fragments d'os d'un jeune adulte.



Deux mouvements d'expansion, germanique et romain, se rencontrent aux premiers siècles de notre ère.

Une écriture inventée pour délivrer des messages brefs

Kristel Zilmer est partagée entre l'excitation et la prudence : elle sait parfaitement qu'aucune inscription runique connue ne remonte aussi loin que la fin de l'âge du fer, au Ier siècle de notre ère. Il faut attendre l'an 150 environ pour observer les toutes premières sur de petits objets — un peigne en os, des armes, des fibules… —, tous trouvés au sud du Danemark, et non en Norvège. Plus déroutant encore : les pierres runiques, elles, ne semblent pas être apparues avant la fin du IVe siècle, voire le début



Baptisé « pierre de Svingerud », ce bloc de grès de 30 cm de côté, trouvé fin 2021 en Norvège, comporte huit lettres gravées. Ce serait la plus ancienne pierre runique connue.

ALEXIS PANTOS/KHM, UIO

du Ve siècle ! « *Avant de me réjouir, je voulais être sûre qu'il ne s'agissait pas d'un ajout secondaire à une tombe ancienne ou d'une imitation de pierre runique fabriquée par quelqu'un à une époque plus récente, dont il existe quelques cas en Norvège.* » Aussi, se pose-t-elle ce jour-là la question suivante : est-il possible que cette petite dalle soit non seulement la plus ancienne pierre runique, mais aussi le plus ancien artefact comportant des runes jamais retrouvé ?

Kristel Zilmer devra attendre le printemps 2022 et les résultats de l'analyse au radiocarbone des restes du bûcher funéraire pour obtenir la réponse : la pierre a bel et bien été enterrée dans une fourchette de temps comprise entre 25 et 250 de notre ère. Soit extrêmement tôt dans l'histoire des runes. Un échantillon d'os humain tend même à réduire ce laps de temps, puisqu'il aurait été brûlé entre 25 et 120 de notre ère. Alors que ces résultats ont été rendus public en janvier, la runologue norvégienne est désormais en droit de se l'avouer : celle qui fut entre-temps baptisée la « pierre de Svingerud » n'est autre qu'un témoignage exceptionnel capable d'éclairer comme aucun autre la genèse encore mystérieuse de l'écriture runique.

Runes et certitudes archéologiques ne font effectivement pas bon ménage. « *Nous savons que l'alphabet runique a été inventé au début de notre ère dans un but épigraphique — c'est-à-dire pour écrire des noms, des titres ou d'autres messages brefs —, à un moment où les Germains formaient encore à peu près une unité* », explique Alessia Bauer, runologue et directrice d'études à l'École pratique des hautes études, à Paris. Mais les choses se corsent lorsqu'il s'agit de comprendre pourquoi ce peuple qui, durant des siècles, s'est passé de tout système d'écriture, privilégiant la transmission orale de ses lois et ses mythes, a décidé de créer cette écriture. « *On suppose que le contact avec les civilisations du Sud, et tout particulièrement avec les Romains, fascinants à bien des égards et chez qui l'écrit est omniprésent, a pu favoriser son apparition* », poursuit la chercheuse. Au Moyen Âge tardif, époque qui marquera

ALESSIA BAUER

« Le contact avec les civilisations du Sud, et tout particulièrement avec les Romains, a pu favoriser l'apparition de cette écriture »

Alessia Bauer, runologue, directrice d'études à l'École pratique des hautes études, à Paris

ALPHABET

L'ancêtre lointain des langues nordiques

Le futhark (*fuþark*) ancien, à savoir la rangée runique d'origine, tire son nom de ses six premiers phonèmes sur les 24 qu'il comporte : f, u, th, a, r, k. Comme les lettres de l'alphabet latin, les runes sont équivalentes à des sons, de sorte qu'il est nécessaire de connaître au préalable la langue utilisée par une population à l'origine d'une inscription runique pour espérer la déchiffrer. De 200 à 700 environ, les inscriptions runiques scandinaves correspondent à du proto-norrois ou proto-nordique, ancêtre lointain des langues nordiques modernes. Plus au sud sur le continent, le futhark ancien sert à écrire le gothique, le pré-vieil anglo-saxon ou encore le pré-vieux allemand. À partir du début du IXe siècle et jusqu'au Moyen Âge, de nombreuses inscriptions seront produites au nord avec une rangée réduite à 16 signes, appelée le futhark récent.

K. ZILMER, HISTORICAL MUSEUM, UNIVERSITY OF OSLO

ᚠ ᚢ ᚦ ᚨ ᚱ ᚲ ᚷ ᚹ ᚺ ᚾ ᛁ ᛃ ᛈ ᛇ ᛉ ᛊ ᛏ ᛒ ᛖ ᛗ ᛚ ᛜ ᛞ ᛟ
f u þ a r k g w h n i j p ï z/R s t b e m l n/ng d o

Les 24 lettres du futhark ancien avec leur translittération.

la fin de leur emploi, les runes finiront par devenir un moyen de communication comme un autre. Destinées à faire passer des messages courts, *« un peu à la façon de nos SMS aujourd'hui »*, elles seront gravées à la hâte sur des bâtonnets retrouvés en nombre dans toute l'Europe du Nord, en particulier en Norvège.

Une pierre commémorative qui intrigue les chercheurs

Les spécialistes ont en tout cas une certitude : leur usage était au départ réservé à une élite. *« Qu'elles soient employées sur des objets ou sur des pierres, les runes servaient à commémorer l'aristocratie. »* La pierre de Svingerud serait ainsi un fragment d'une pierre beaucoup plus grande qui aurait servi de mémorial à un défunt de haut rang. De ce défunt, pour le moment, nous ne savons rien, malgré la relative abondance des caractères runiques sur la pierre : *« Fines et peu profondes, les inscriptions ressemblent presque à des gribouillages,* s'étonne Kristel Zilmer. *C'est extraordinaire de voir cela sur une pierre commémorative, on a presque l'impression que quelqu'un a imité ou joué avec l'écriture. Je n'ai jamais rien vu de tel. »* Ce qui apparaît le plus clairement est une séquence de huit runes, pour laquelle l'une des interprétations possibles est qu'elle corresponde au nom d'une personne : Idiberug. *« Mais comme tous les caractères qui figurent sur cette pierre, et comme à peu près toutes les inscriptions runiques anciennes, même ce mot bien lisible nous pose un défi »*, admet la runologue norvégienne. Absence d'espace entre les mots, sens de l'écriture variable, signes apparaissant parfois en image miroir, voire totalement à l'envers… Les inscriptions runiques semblent faire fi de toute règle. *« Dans cette discipline, chaque inscription — même la plus courte — peut changer les théories postulées,* assure Alessia Bauer. *Sur le fond, l'inscription la plus lisible de la pierre de Svingerud pourrait ne rien avoir d'extraordinaire. Mais dans sa forme et par sa précocité, elle a de quoi bousculer nos connaissances. »*

KRISTEL ZILMER, HISTORICAL MUSEUM, UNIVERSITY OF OSLO

Cette rune b, dotée de quatre poches au lieu des deux habituelles, serait peut-être une forme archaïque inconnue.

De nouveaux blocs découverts pourraient compléter le puzzle

Les experts avaient par exemple toujours pensé jusqu'ici que la rune e (la cinquième sur les huit de l'inscription lisible de Svingerud) n'avait pris cette forme qu'à partir du Ve siècle. Or, son emploi sur la pierre de Svingerud indique qu'elle a pu être utilisée dès la naissance de cette écriture. Alessia Bauer note également la présence étrange d'une rune b à quatre poches au lieu des deux habituelles. *« Est-elle comme cela parce que la personne qui l'a tracée s'est trompée ? Ou parce qu'il s'agit d'une forme archaïque que nous ne connaissons pas ? Seule une étude plus approfondie nous le dira. Avec les runes, nous devons constamment être prêts à repenser nos modèles. »* Comme Alessia Bauer, Kristel Zilmer invite à la patience. D'ici à quelques mois, elle et ses collègues du musée livreront leurs conclusions dans plusieurs publications scientifiques, dont une spécifiquement axée sur les révélations linguistiques de la pierre. Mais de nouvelles découvertes pourraient changer la donne : en août et octobre 2022, les archéologues, de retour à Svingerud, ont mis la main sur d'autres blocs de grès comportant des lignes incisées et des runes. Quatre fragments se sont avérés compatibles, de sorte qu'ils ne formeraient qu'une seule et même inscription. Le puzzle se complète. ■ **Marine Benoit** @marin_eben

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE
INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs chaque jeudi de 17H30 à 19H sur https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !	plus de 160 000 followers	plus de 163 000 instagrammeurs	Plus de 7 000 abonnés professionnels	plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

Les objets connectés sont particulièrement vulnérables. Grâce à une webcam, par exemple, on peut facilement récupérer le mot de passe du Wi-Fi auquel celle-ci est reliée.

Cinq questions pour se protéger des cyberattaques

Face à des cybercriminels de mieux en mieux renseignés, les experts et chercheurs en cybersécurité développent de nouvelles solutions pour protéger nos données.

Par Régis de Closets, avec Agence Forum News

1 Quelles sont les nouvelles techniques des cyberpirates ?

Les piratages massifs de bases de données en ligne, ces dernières années, ont favorisé l'accès à des informations personnelles pour les cybercriminels. Selon l'étude de la société de cybersécurité Tenable, 40 milliards de données auraient ainsi été volées ou perdues en ligne rien qu'en 2022. Soit 78 % de plus que l'année précédente. Les données médicales d'un patient aux États-Unis, par exemple, se revendent en moyenne sur le Dark Web (Web caché) entre 1 et 25 dollars ; entre 1 et 3 dollars pour un compte Netflix piraté. Ces informations (numéro de sécurité sociale, abonnements, fichiers de contacts…) ne suffisent pas à infiltrer les comptes personnels, mais elles donnent des moyens sans précédent pour usurper les identifiants, soit en devinant leurs mots de passe, soit en se faisant passer pour un tiers de confiance (on parle alors d'« hameçonnage »). Selon l'étude de l'entreprise de cybersécurité Imperva Analytics, plus de 90 % des attaques sur les sites de e-commerce en 2022 mettaient à profit des informations provenant de bases de données piratées. Selon le site de l'organisme public d'assistance aux victimes de piratage www.cybermalveillance.gouv.fr, 35 % des arnaques en ligne ont utilisé des informations personnelles pour se faire passer pour de faux prestataires techniques, organismes de formation, banques ou services des impôts. *« Les pirates sont souvent bien renseignés et n'hésitent pas à user de faux courriels, mais aussi de SMS ou même d'appels à partir de numéros piratés »*, explique Gérôme Billois, associé cybersecurité au cabinet de conseil Wavestone.

2 Pourquoi faut-il mieux sécuriser les objets connectés ?

Si les cybercriminels rachètent des données piratées, ils peuvent aussi les récupérer par eux-mêmes en utilisant un pan de notre environnement numérique moins sécurisé : celui de l'Internet des objets. Ces ampoules intelligentes ou montres connectées pullulent autour de nous sans avoir les mêmes niveaux de sécurisation que nos ordinateurs ou smartphones. Et pour cause : le marché très concurrentiel et peu réglementé n'incite pas les fabricants à investir dans la cybersécurité. *« C'est un tort car au moyen d'une caméra connectée, on peut récupérer le mot de passe du Wi-Fi auquel elle est reliée, de même que la connexion aux capteurs de température d'une station énergie permet de savoir à distance si un domicile est occupé ou pas… »*, explique Bertrand Carlier, animateur du groupe de travail « Sécurité de l'Internet des objets » du Clusif (l'association des acteurs économiques de la cybersécurité), qui vient de publier un guide sur le sujet. Pour limiter les risques, un marquage CE dédié devrait prochainement indiquer les objets connectés répondant aux règles de cybersécurité essentielles. ▶

ERLON SILVA - TRI DIGITAL / GETTY IMAGES

24 % des Français ont connu une cybermenace ou attaque sur ordinateur durant les deux dernières années (20 % pour les données sur smartphone). **250 000 internautes** victimes d'actes de cybermalveillance en 2022. **1 euro en moyenne** est fraudé sur 10 000 euros de paiements sans contact effectués en France en 2022.

SOURCES : SONDAGE 2022 MIPS/CLUSIF. - WWW.CYBERMALVEILLANCE.GOUV.FR - OSMP

presse citron

Meilleur antivirus

★★★★★

01NET

Suite hyper complète

★★★★

PC EDITORS' CHOICE

Choix de la rédaction

★★★★½

Téléchargez gratuitement sur avast.com/sciences

Bien plus qu'un simple antivirus

Avast One regroupe protection, confidentialité et performances.

N'oubliez pas de protéger votre smartphone.

Téléchargez gratuitement Avast One sur mobile

Avast One

© 2022 Copyright Avast Software

3 Nos mots de passe sont-ils assez sûrs ?

Face à ces usurpations d'identité, la sécurisation des identifiants devient cruciale. Mais elle reste complexe quand on sait qu'un internaute utilise en moyenne cent sites ou mails nécessitant des mots de passe. L'Anssi(Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information) recommande des combinaisons suffisamment longues (17 caractères) et mixant au moins 8 caractères spéciaux différents — sachant qu'un simple prénom ou une date de naissance est deviné en quelques secondes… Les solutions ? Le recours à un gestionnaire de mots de passe qui attribuera et renouvellera automatiquement vos mots de passe pour chaque compte. Autre possibilité : se référer régulièrement à des sites indiquant si son mot de passe ou son adresse courriel ont été piratés (et s'il est urgent de les changer). Le plus célèbre, haveibeenpwned.com, recense 12 milliards d'identifiants déjà volés.

4 Et si les neurosciences aidaient à se protéger ?

Pour se protéger, il faut sécuriser les accès, mais aussi sensibiliser les utilisateurs. Les attaques usent en effet de ressorts psychologiques de plus en plus élaborés pour inciter à cliquer sur de faux liens ou donner ses codes. Si les formations se multiplient en entreprise, les neurosciences sont également mobilisées pour identifier les « failles cognitives » les plus fréquemment mises à profit contre les particuliers. Une étude récente du chercheur en sciences cognitives Bruno Teboul et de la société Mailinblack sur la base de 200 000 simulations d'attaques a mis en lumière des leviers récurrents (appât du gain, curiosité, stress aigu) ainsi que des situations de vulnérabilité courantes. La surcharge de travail ou le traitement simultané de courriels notamment entraîneraient un effet dit tunnel où l'attention se focalise sur la cause du stress, ignorant dans un courriel suspect des signaux d'alerte comme une adresse Web mal formulée ou des fautes d'orthographe.

AVIS D'EXPERTE

SOLANGE GHERNAOUTI PROFESSEURE À L'UNIVERSITÉ DE LAUSANNE *

« Le risque cyber oblige à interroger nos usages numériques »

Vous suivez depuis plus de vingt ans les enjeux de cybersécurité. Quel bilan tirez-vous de la lutte contre ces risques ?

On a pendant longtemps laissé la main aux techniciens. Cela a conduit au développement de solutions de protection, mais sans jamais questionner les vulnérabilités des produits commercialisés, ni interroger l'exposition grandissante aux risques qu'induit notre quotidien multiconnecté. Cette fuite en avant technologique atteint ses limites face à une société fragilisée par la dépendance numérique et où le coût de l'insécurité est porté par l'usager et la société.

REBECCA BOWRING

La migration des données dans des clouds et plateformes apparaît comme une solution de sécurisation. Partagez-vous cette vision ?

La concentration des ressources dans un *cloud* ou une plateforme revient à concentrer la malveillance sur un point d'attaque unique avec effets démultiplicateurs de la puissance de nuisance sur l'ensemble des clients. Plusieurs *clouds* ont été attaqués ces dernières années ainsi que des plateformes comme les gestionnaires de mots de passe (par exemple, LastPass). Ce n'est pas une garantie de sécurité, d'autant que ces délégations peuvent poser des problèmes de souveraineté et de transparence.

Vous appelez à valoriser la « retenue numérique ». Qu'entendez-vous par là ?

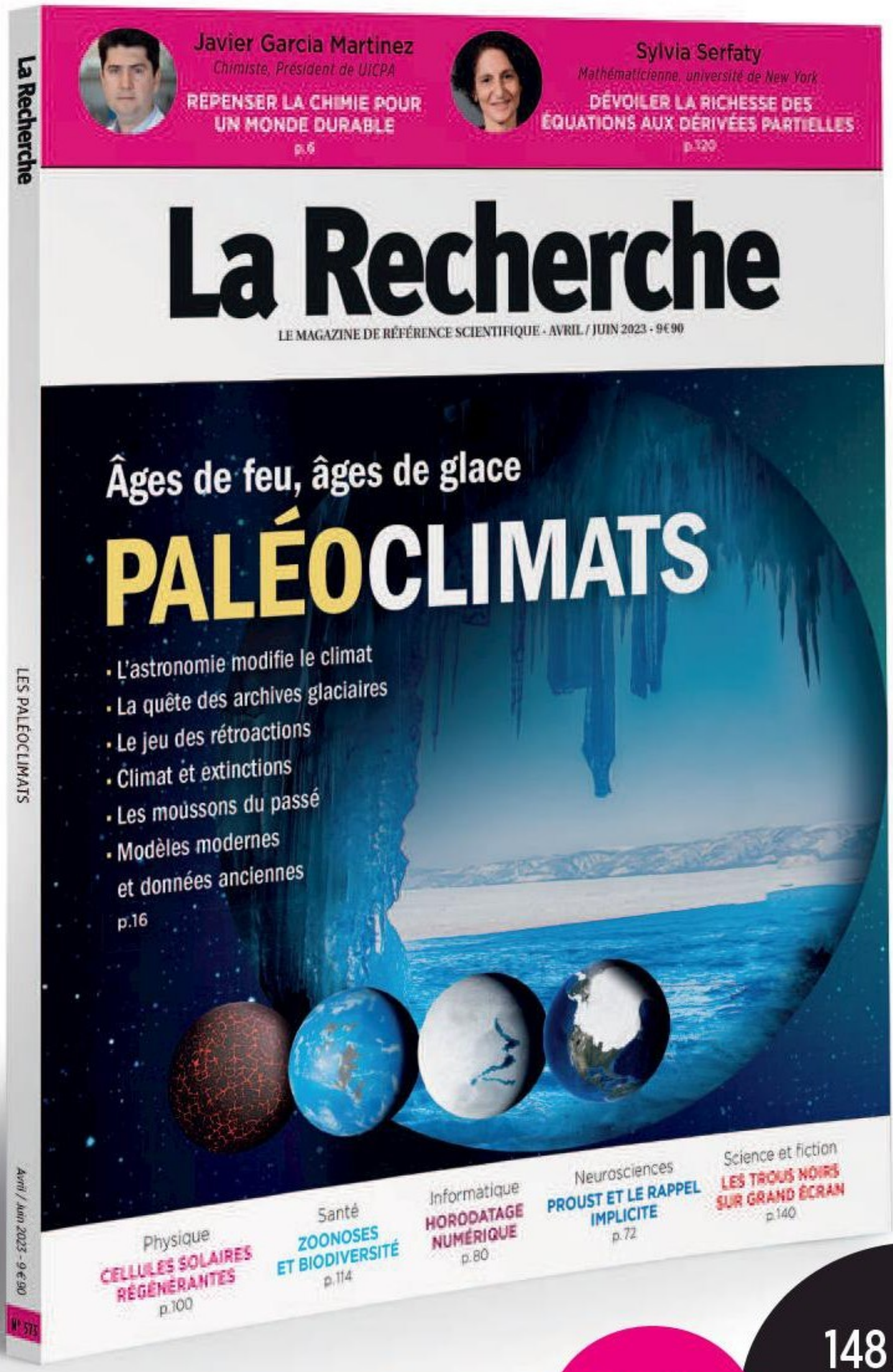
Il faut changer de vision et admettre que l'urgence suppose une approche plus préventive. Il faut réinstaurer de la maîtrise et du contrôle humain, en reprenant en main nos données et en rationalisant nos usages numériques. Nombre d'actes de notre quotidien n'ont pas de nécessité à être connectés. ■ **Propos recueillis par R. de C.**

* Elle y dirige le Swiss Cybersecurity Advisory & Research group. Auteure de *Cybersécurité. Analyser les risques, mettre en œuvre les solutions* (Dunod).

5 En quoi l'informatique quantique est-elle le prochain défi de la cybersécurité ?

La protection de nos données essentielles (mots de passe, signatures électroniques…) repose sur des protocoles de chiffrement que les ordinateurs actuels mettraient des années à percer. Avec la puissance des futurs ordinateurs quantiques, quelques heures suffiraient pour récupérer les clés de chiffrement de ces données sensibles. Selon les experts, ces nouvelles générations de machines devraient être opérationnelles entre 2030 et 2045. La course est donc engagée pour mettre au point la « cryptographie postquantique » à même de sécuriser les données à l'avenir. Le NIST (National Institute of Standards and Technology) aux États-Unis a lancé un concours planétaire pour mettre au point les premiers algorithmes de chiffrement quantique. Sélectionnés cette année, ils seront intégrés chez les opérateurs dans les dix prochaines années. ■

34 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO



La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

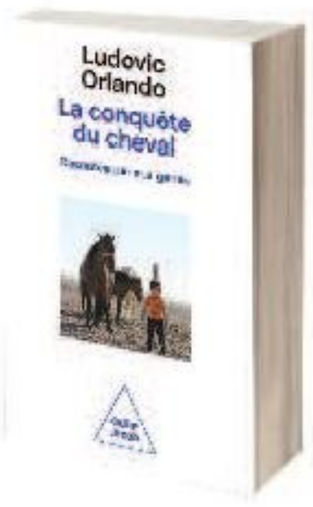
BARBARADOMBROWSKI/LAIF-REA

L'origine des chevaux modernes a été établie en 2021 grâce au séquençage de génomes anciens.

L'histoire mondiale du cheval par la génétique

Le spécialiste de l'ADN ancien Ludovic Orlando livre les résultats des dix années de recherche que ses collègues et lui ont consacrées à nos compagnons équins, sous la forme d'une fresque historique captivante.

DOMESTICATION Mouton, chien, cochon, vache et chèvre font partie des premiers mammifères domestiqués par l'humain. Et le cheval dans tout ça ? Son histoire commune avec notre espèce débute il y a environ 4200 ans, dans les steppes du nord du Caucase. Le succès est immédiat : « *En quelques siècles à peine, nous retrouverions ce cheval […] des côtes de l'Atlantique à celles du Pacifique, comme l'instrument d'une nouvelle ère qui venait de démarrer* », explique Ludovic Orlando. C'est lui qui, avec son équipe de quelque 600 chercheurs et chercheuses, est parvenu à la retentissante découverte du berceau des chevaux domestiques modernes, à l'automne 2021. L'apothéose d'une dizaine d'années de tâtonnements, d'espoirs, d'erreurs, de rebondissements, et surtout de persévérance et de travail méthodique. Quelques chiffres issus du livre donnent d'ailleurs un aperçu de l'ampleur de la tâche accomplie : au total, plus de 200 datations au carbone 14 auront été effectuées, et plusieurs centaines de milliards de séquences d'ADN auront été générées !



Fin vulgarisateur, Ludovic Orlando est aussi un formidable conteur. Sa plume fait des merveilles — autant que ses séquenceurs d'ADN ! — quand il s'agit de nous faire voyager à travers le temps et l'espace à la découverte de ses recherches : sur la piste des chevaux préhistoriques, chez qui il existait une incroyable diversité génétique ; aux origines du cheval arabe, si élégant et si endurant ; ou encore à la rencontre des mulets et de leurs surprenantes capacités de résistance. Au total, son histoire mondiale du cheval par la génétique se compose de 13 chapitres. Une odyssée fascinante. ■ **Vincent Glavieux**

La Conquête du cheval, Ludovic Orlando, Odile Jacob, 288 p., 22,90 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 92
▶ Le ciel du mois p. 93
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Solutions des jeux p. 97
▶ Jeux p. 98

Le rapport du Giec décortiqué

CLIMAT Le journaliste scientifique Sylvestre Huet raconte dans ce livre la prise de conscience du réchauffement climatique par la communauté scientifique, qui fut assez rapide, et celle, plus lente, par les politiques et la société civile. De la création du Giec, en 1988, politique par son origine, mais scientifique par son mode de travail, jusqu'à son dernier rapport, l'ouvrage offre un bon résumé de nos connaissances actuelles. Une lecture recommandée pour mieux comprendre les principes physiques sous-jacents du climat et les enjeux auxquels nous devons faire face. ■ **Ph. P.**

Le Giec. Urgence climat, Sylvestre Huet, Tallandier, 272 p., 19,90 €

La mécanique du profilage

PISTAGE Sur Internet, recommander des contenus, adresser une publicité, surveiller voire prédire des comportements sont d'une précision diabolique grâce au profilage. L'auteur évite le thème, beaucoup traité, des

algorithmes hostiles à la démocratie pour se centrer sur cette mécanique qui fonde l'économie d'Internet, et trouve ses racines dans la gratuité de ses services phares. Il montre qu'à trop vouloir optimiser l'expérience en ligne, le profilage tend à annihiler la notion même d'expérience. ■ **A. D.**

Les Sociétés du profilage, Philippe Huneman, Payot, 432 p., 24 €

Hergé, homme de sciences

ENQUÊTE À la lecture des albums de Tintin, les deux auteurs astrophysiciens se sont

étonnés de la justesse des contenus techniques et scientifiques des planches d'Hergé. Celui-ci s'appuyait sur une vaste documentation et l'avis de scientifiques pour imaginer les aventures du jeune reporter. Ils ont mené des enquêtes savantes pour localiser le temple du Soleil, identifier l'étoile mystérieuse ou retracer les aventures lunaires de Tintin et du capitaine Haddock. Cette nouvelle édition profite des dernières découvertes scientifiques. ■ **S. R.**

Mais où est donc le temple du Soleil ?, Roland Lehoucq, Robert Mochkovitch, Flammarion, 208 p., 21,90 €

Au cœur de la génétique de l'autisme

APPROCHE C'est en ayant l'idée de se concentrer sur les gènes impliqués dans le fonctionnement des synapses que l'équipe de Thomas Bourgeron, à l'Institut Pasteur, a identifié en 2003 les premières mutations à l'origine d'une forme d'autisme. Depuis, plus de 200 gènes ont été identifiés,

expliquant 25 % des cas. L'académicien nous entraîne dans cette enquête scientifique passionnante, inaugurant une nouvelle façon de comprendre « les » autismes, et envisager des traitements avec un rationnel scientifique solide, enfin. ■ **H. J.**

Des gènes, des synapses, des autismes, Thomas Bourgeron, Odile Jacob, 320 p., 23,90 €

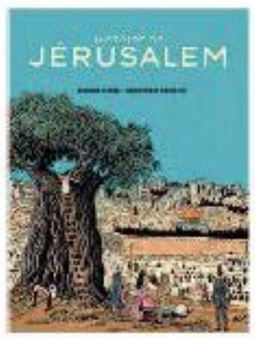
Reprendre les fondamentaux en sciences

DÉCRYPTAGE *« La science, c'est une affaire de génie… Une hypothèse, c'est prouver un "truc" qu'on a déjà en tête… Les scientifiques se trompent, on ne peut pas leur faire confiance…»* Que d'idées reçues ! Elles cheminent dans notre société, et la crise du Covid-19, souvent pointée du doigt à ce sujet, est aussi évoquée par l'auteure comme un événement qui a fait vaciller la confiance en la science. Elle insiste sur la différence entre opinion, croyance et connaissances, pointe les carences en matière de formation des enseignants et analyse les mécanismes d'élaboration des *fake news*. Son ouvrage, pédagogique, accessible et agréable par sa forme enrichie de dessins teintés d'humour, est bâti autour de l'histoire des sciences. De nombreux exemples expliquent les fondements de la méthode scientifique, mettent en exergue l'importance d'un cadre de pensée, ainsi que du travail d'équipe, de la stratification des connaissances, et surtout de la confrontation et la validation d'un travail par les pairs. Éclairant et plus que nécessaire ! ■ **Andreina De Bei**

La Science à l'épreuve des mauvaises langues, Annabelle Kremer-Lecointre, dessins Arnaud Rafaelian, Delachaux et Niestlé, 208 p., 22,90 €

Portrait d'une cité de 4000 ans

BD Avec un grand talent de vulgarisateur, l'historien Vincent Lemire, directeur du Centre de recherche français de Jérusalem, raconte l'histoire quadrimillénaire de cette ville, tour à tour égyptienne, perse, juive, grecque, romaine, byzantine, arabe, croisée,

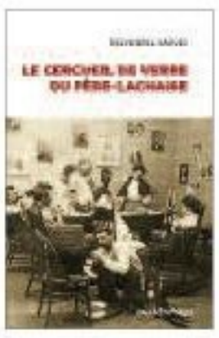


mamelouke, ottomane, anglaise, jordanienne, palestinienne et israélienne, devenue le *« nombril du monde »*. Fruit de six années de recherche, l'ouvrage fait la part belle aux récits de voyageurs. Il s'appuie sur plus de 200 sources et des archives inédites. Et se dévore de bout en bout. ■ **F. D.**

Histoire de Jérusalem, Vincent Lemire et Christophe Gaultier, Les Arènes, 256 p., 27 €

La première légende urbaine

IMAGINAIRE En 1893 naît une étrange rumeur : une princesse russe décédée aurait promis sa



fortune à quiconque accepterait de veiller durant un an sa dépouille, conservée dans un cercueil de verre au cimetière du Père-Lachaise, à Paris. Jusqu'aux années 1930 au moins, les lettres de candidats du monde entier vont s'accumuler, encouragées par les articles de presse consacrés au sujet. Archives à l'appui, l'historienne Stéphanie Sauget retrace la construction de ce qui est considéré comme la première légende urbaine française. ■ **M. B.**

Le Cercueil de verre du Père-Lachaise, Stéphanie Sauget, CNRS Éditions, 336 p., 25 €

EXPOSITIONS

Bordeaux (33)

Jāngala : au cœur de la jungle indienne
Une scénographie jalonnée d'animaux naturalisés et de citations du *Livre de la Jungle* de Rudyard Kipling permet d'explorer cet environnement si particulier qu'est la jungle. L'occasion de voir qu'elle ne se résume pas à une forêt luxuriante. (Lire notre reportage : sciav.fr/914jungle)
Muséum, 5, place Bardineau, jusqu'au 17 septembre. Rens. : 05.24.57.65.30.

Moulins (03)

La Fabuleuse Aventure archéologique du docteur Bailleau
Guillaume-Joseph Bailleau (1830-1909), amateur d'archéologie, a contribué à enrichir les connaissances sur les premiers humains dans l'Allier. Dispersée à sa mort, sa collection a en partie été récupérée par le département.
Musée Anne-de-Beaujeu, place du colonel Laussedat, jusqu'au 17 septembre. Rens. : 04.70.20.48.47.

Paris (75)

Permis de conduire ?
L'automobile et les innovations associées (motorisation, aide à la conduite) sont à l'honneur, jusqu'aux fantasmes de voitures volantes. Mais l'exposition s'interroge beaucoup sur le futur d'une machine devenue problématique. (Lire notre reportage : sciav.fr/914voiture)
Musée des Arts et Métiers, 60, rue Réaumur, jusqu'au 7 mai. Rens. : 01.53.01.82.63.

Félins
80 naturalisations et 10 squelettes dynamiques immergent le visiteur dans le monde des félins. Certaines pièces de taxidermie remontent au XVIIIe siècle, d'autres ont été créées pour l'occasion. (Lire notre reportage : sciav.fr/914felins)
Grande Galerie de l'évolution, 36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, jusqu'au 7 janvier 2024. Rens. : 01.40.79.56.01.

Marseille (13) / Exposition

Alexandrie : futurs antérieurs

Première ville d'Égypte bâtie sans connexion avec le Nil, Alexandrie fut fondée en 331 avant J.-C. par Alexandre le Grand et devint la capitale de la dynastie ptolémaïque jusqu'à la conquête romaine, en 30 avant J.-C. L'exposition Alexandrie : futurs antérieurs couvre cette période et va jusqu'à l'avènement du christianisme autour de 381. Quelque 200 objets mettent en lumière le patrimoine et l'héritage d'Alexandrie en construisant des ponts avec la cité actuelle, dont certaines problématiques étaient déjà prégnantes durant l'Antiquité, telle la gestion de l'eau. Après une première section centrée sur l'urbanisme, un espace évoque les figures qui ont forgé la ville et contribué à son rayonnement (Ptolémée Ier, Cléopâtre VII). Une autre section aborde la religion et la jonction, réussie, du panthéon grec et des divinités égyptiennes. Avant que de rares objets du quotidien extirpés des fouilles de sauvetage ne nous parlent de la vie des élites. (Lire notre reportage : sciav.fr/914alexandrie). ■ **Joël Ignasse**

A. ÇAVUŞOĞLU. COURTOISIE I. & M. İÇÖZ - PHOTO : HADİYE CANGÖKÇE

La figure d'Alexandre le Grand, revendiquée par la Grèce et par la Macédoine du Nord, interrogée par l'artiste Asli Çavuşoğlu.

Mucem, 7, promenade Robert-Laffont, jusqu'au 8 mai. Rens. : 04.84.35.13.13.

Rézé (44)

C'est arrivé près de chez vous
L'exposition retrace dix ans d'archéologie dans l'agglomération nantaise. Elle montre le travail de diagnostic et de fouille dans un contexte de développement urbain.
Le Chronographe, 21, rue Saint-Lupien, jusqu'au 7 janvier 2024. Rens. : 02.52.10.83.20.

Rouen (76)

Normands. Migrants, conquérants, innovateurs
Cette exposition consacrée aux Scandinaves du IXe au XIIe siècle a un prolongement au musée des Beaux-Arts. Avec les Vikings pour fil rouge, elle aide à comprendre le contexte de l'expansion scandinave.
Musée des Antiquités, 198, rue Beauvoisine, à partir du 14 avril et jusqu'au 13 août. Rens. : 02.76.30.39.50.

PARTENARIATS SCIENCES AVENIR

Paris (75)

Livre en dialogue
Dans le cadre d'un cycle de rencontres autour de nouvelles parutions en sciences humaines et sociales, cette soirée sera l'occasion d'un échange avec la politologue spécialiste de l'Afrique Séverine Autesserre, auteure de *Sur les fronts de la paix* (éditions de la Maison des sciences de l'homme).
Comptoir de la Fondation Maison des sciences de l'homme, 54, boulevard Raspail, le 20 avril à 18h30. Rens. : www.fmsh.fr/livres-en-dialogue

Sur le Web

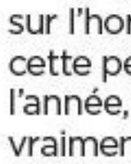
Croisière sur le Nil
L'égyptologue Pascal Vernus évoquera lors d'un webinaire les conférences qui auront lieu à bord de la croisière en Égypte, du 22 au 30 novembre avec *Sciences et Avenir-La Recherche*.
Le 20 avril à 18 h. Renseignements et inscriptions : www.sa-egypte.fr. Demande de brochure : 01.84.76.22.35.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

LE CIEL D'AVRIL

PAR JOHAN KIEKEN

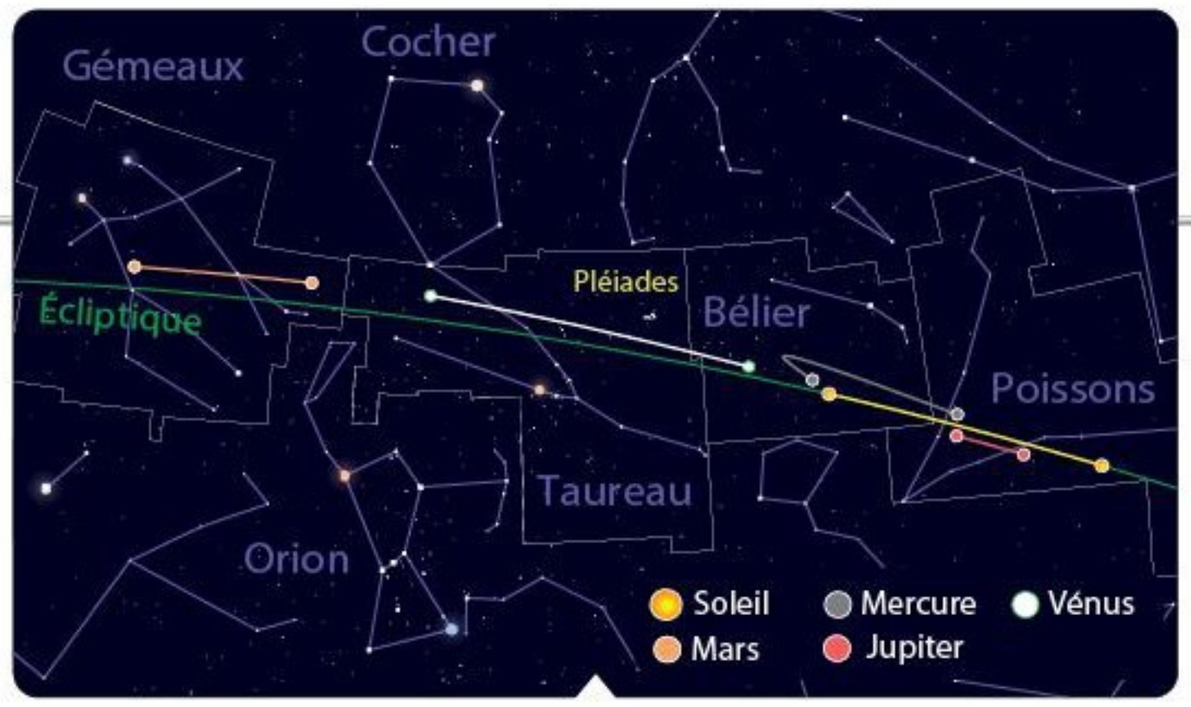
Où sont les planètes ?



MERCURE
La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (19,5°) à l'est du Soleil le 11. Elle est visible vers le couchant en soirée durant les deux premières semaines d'avril.

VÉNUS
L'étoile du Berger est immanquable en soirée en raison de sa bonne hauteur sur l'horizon ouest et de son éclat remarquable. Profitant d'un écliptique très incliné sur l'horizon le soir en cette période de l'année, Vénus est vraiment la planète reine de ce printemps!

MARS
La planète Rouge est visible dès la tombée de la nuit et se couche vers 3 heures du matin. Point désormais moyennement brillant, Mars continue à s'éloigner de la Terre et à perdre de l'éclat au fil des semaines.



Les positions des planètes et du Soleil sont données les 1er et 30 avril. Ces astres se déplacent de la droite vers la gauche de l'image. Les constellations traversées par l'écliptique sont appelées constellations du zodiaque.

Le zodiaque, autoroute des planètes

LA RÉVOLUTION DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL entraîne un léger glissement quotidien de celui-ci vers l'est, à raison de 1° par jour. En un an, la trajectoire du Soleil définit un cercle sur la sphère céleste : l'écliptique. Les planètes tournant autour du Soleil dans des plans peu inclinés par rapport à l'écliptique, elles n'en sont jamais très éloignées.

Notre conseil Si l'observation de Mars et de Vénus est facile, Mercure nécessite un horizon ouest dégagé pour être décelée. Par la pensée, faites passer une ligne par ces planètes : vous aurez matérialisé un morceau de l'écliptique.

MERCURE, À L'ÉCLAT DÉCROISSANT, est observable le soir vers le couchant durant la première quinzaine du mois. La scène est représentée 45 minutes après le coucher du Soleil.

LE SOIR DU 23, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, le fin croissant de Lune ne sera qu'à 3° au-dessus de la planète Vénus, à une quinzaine de degrés de hauteur.

LE SOIR DU 25, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, la Lune se trouvera à moins de 5° de la planète Mars, non loin de Castor et Pollux, les deux étoiles principales des Gémeaux.

JUPITER
La plus grosse des planètes passe en conjonction avec le Soleil le 11, dans les Poissons. Elle n'est pas observable ce mois, noyée dans l'éclat du jour.

SATURNE
Deux mois après son passage en conjonction avec le Soleil, la planète aux anneaux fait une timide réapparition dans le ciel de fin de nuit. Alors que s'annoncent déjà les lueurs de l'aube, elle est visible très bas vers le sud-est, sous la forme d'un point peu brillant.

L'appli du mois

SKY ACADEMY est une application gratuite avec achats intégrés en anglais pour iOS et Android. Son but est de vous apprendre à reconnaître les 88 constellations modernes, les étoiles les plus brillantes et les 110 objets du catalogue de Messier, en vous faisant progresser au moyen de quiz.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel d'avril

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Pertes et dommages

Fin 2022, lors de la COP27, les représentants de l'ensemble des pays du monde décidaient de créer un fonds international pour *« aider les pays en développement particulièrement vulnérables aux effets néfastes du changement climatique, à faire face aux pertes et dommages »*. Une avancée après trente ans d'achoppement des négociations sur les dommages irréversibles dus au changement climatique, qui peuvent aller de destructions d'infrastructures et pertes de ressources jusqu'au déclin de la biodiversité, la disparition de patrimoine culturel, la perte de vies humaines, etc. Une avancée en cette année 2022 marquée par des inondations destructrices et meurtrières au Pakistan, au Nigeria et au Tchad, affectant des millions de personnes, alors que des sécheresses pluriannuelles fragilisent la sécurité alimentaire dans toute la Corne de l'Afrique. Une avancée au regard des connaissances scientifiques qui établissent dans le 6e rapport du Giec que les impacts attribuables à l'influence humaine sur le climat sont déjà perceptibles dans toutes les régions du monde, et que chaque dixième de degré supplémentaire augmente la « facture » des pertes et dommages. C'est une petite victoire pour la justice climatique, la reconnaissance que ceux qui contribuent le moins aux émissions de gaz à effet de serre, subissent de façon disproportionnée le poids des impacts climatiques. Ce fonds doit être opérationnel cette année, mais de nombreuses questions restent pourtant en suspens : comment sera-t-il financé ? Comment seront déterminés les pays éligibles et les montants alloués ? Alors que les effets du changement climatique s'intensifient, la communauté internationale saura-t-elle répondre à la hauteur des enjeux ? ■

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER / HANS LUCAS

MATHÉMATIQUES PAR SYLVIE BENZONI

Sous les mots, le plaisir de comprendre

Le langage de la médecine désigne par des termes techniques des réalités que nous vivons dans notre chair et que nous nommons souvent de manière plus crue. À l'inverse, le langage des mathématiques « recycle » des mots communs pour désigner des concepts abstraits. Racines, puissances, fonctions, origines, groupes, corps, spectres : les exemples sont nombreux et certains ont de quoi faire peur, comme le soutient la psychothérapeute Anne Siety. Même sans avoir peur, il faut du temps pour comprendre un concept mathématique, qu'il porte un nom recyclé ou inventé. Si l'on ajoute à cela les adjectifs utilisés de manière péremptoire — évident, facile, trivial, ou alors beau, élégant, profond —, on voit que la langue mathématique est étrange et mystérieuse. Certains essaient de percer le mystère, comme Léo Larroche dans l'*Imprécis de vocabulaire mathématique* (Athénor, 2018). Cela prend des années pour assimiler les codes de la langue mathématique. Il est rare que cet apprentissage se fasse sans heurt. Ceci justifie sans doute l'une des 21 mesures pour l'enseignement des mathématiques prônées dans le rapport Torossian-Villani (2018), qui met les mots au centre d'un triptyque : « manipuler, verbaliser, abstraire ». Il est frappant qu'il vienne de deux chercheurs de métier, car la recherche mathématique relève *grosso modo* de ce même triptyque. Faire des mathématiques, dans la recherche comme à l'école, c'est d'abord accepter de ne pas tout comprendre du premier coup, puis y trouver du plaisir. ■

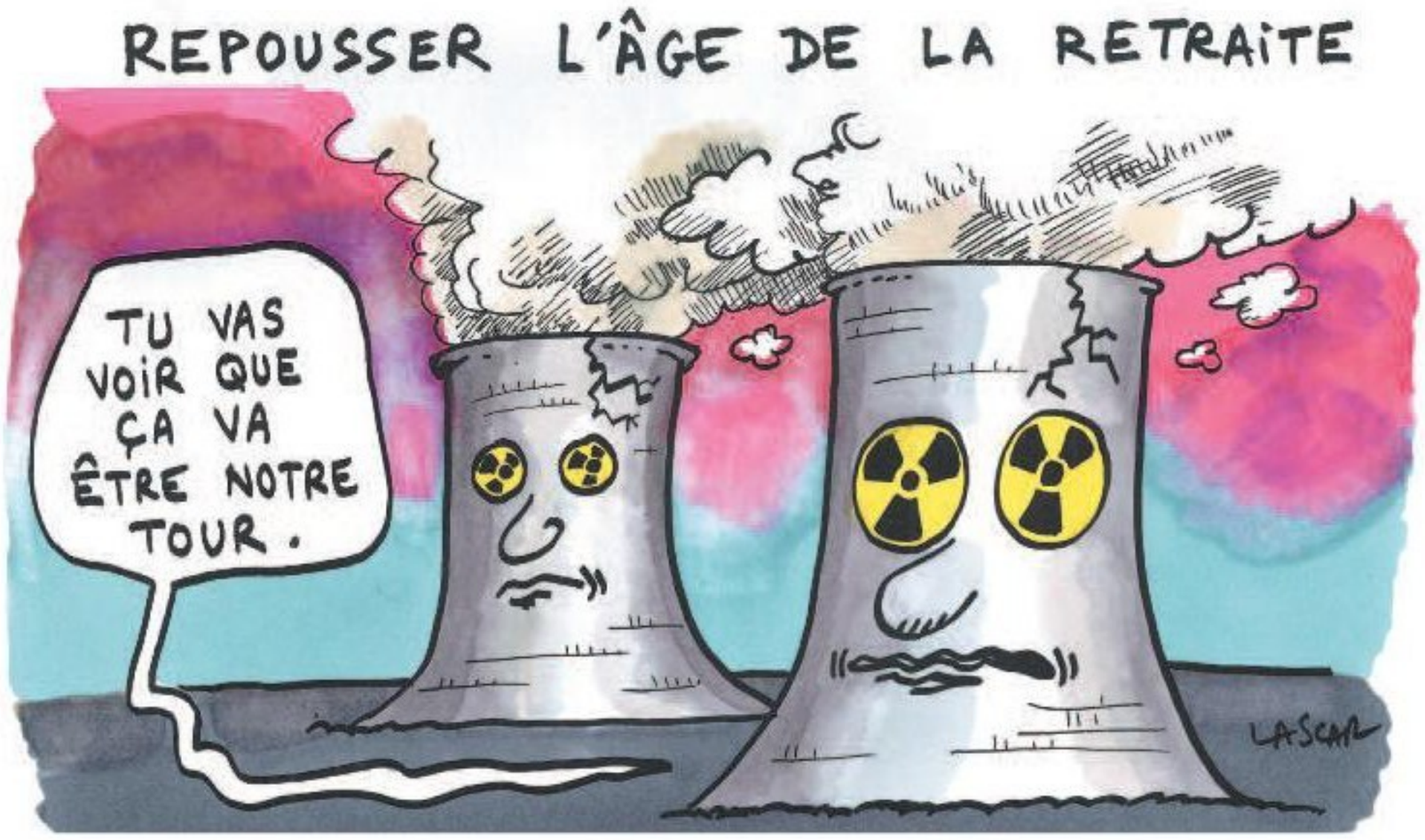
ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

D'Amandine à ChatGPT, les raisons des effets

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

Qui se souvient aujourd'hui d'Amandine, le premier bébé-éprouvette, née le 24 février 1982 d'une fécondation *in vitro* suivie d'une implantation de l'embryon dans l'utérus maternel ? Tri, eugénisme, manipulations génétiques, traumatismes affectifs multiples et probable stérilité des enfants nés dans un tube à essai… On craignit alors le pire, en se rappelant les grands totalitarismes du XX^e^ siècle. L'événement suscita un émoi si considérable que s'ensuivit, l'année suivante, la création du Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé (CCNE). Quarante ans plus tard, la fécondation *in vitro* s'est banalisée et une réflexion éthique bien conduite a permis, jusqu'ici du moins, de surmonter ces écueils. ChatGPT, l'agent conversationnel mis à disposition du public par la société OpenAI *(lire p. 28)*, crée un traumatisme analogue. Tous peuvent le tester. Les textes générés étonnent, puis inquiètent. On invoque, tour à tour, les risques de triche, les billevesées — ce que l'on désigne comme des « hallucinations » —, le chômage des intellectuels ou des propos inconvenants, parce que racistes ou sexistes. Certains en demandent l'interdiction, d'autres, plus nombreux, l'encadrement. On institutionnalisera peut-être des comités d'éthique du numérique afin d'aider le législateur en cette matière, comme on le fit dans les sciences de la vie et de la santé avec le CCNE. Comment ne pas y souscrire ? Revenons sur nos peurs. Que craignons-nous ? On n'a pas attendu ces machines pour frauder, raconter des sornettes ou proférer des injures. Serions-nous devenus hypersensibles ? Ne serait-ce pas plutôt le reflet grossi de nos propres travers que nous percevons là et qui nous effraie ? La crainte de la tricherie révèle l'état pitoyable de l'enseignement, où l'on se soucie plus de notes et de diplômes que de transmission des connaissances. Et il en va de même pour le reste. Or, en nous centrant sur les effets des *chatbots*, nous ne résoudrons pas les causes de ces effets ! ■

BRUNO LÉVY



L'ŒIL DE LASCAR

Nucléaire, le retour. Emmanuel Macron a annoncé que la France allait s'équiper de six nouveaux réacteurs (de type EPR). EDF doit aussi étudier la possibilité de prolonger la vie des centrales existantes au-delà de 60 ans (contre 40 ans aujourd'hui). Dans ce contexte, la disparition annoncée de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) interroge : l'Institut devrait en effet être fusionné avec le gendarme du nucléaire, l'ASN. En perdant son indépendance, l'IRSN pourrait aussi être moins audible quant à ses avis techniques sur l'état des centrales gérées par EDF. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ASTRONOMIE

Pourquoi la Lune est-elle visible le jour ?

D'jone P.

On associe habituellement la Lune à la nuit. Or, notre satellite est souvent visible en plein jour, environ six heures quotidiennement, sous certaines conditions. « *Contrairement au Soleil, la Lune ne crée pas sa propre lumière. Nous pouvons seulement la voir lorsque la lumière du Soleil se reflète sur sa surface,* explique Sarah Noble, planétologue à la Nasa. *De plus, elle brille assez pour se faire remarquer, ce qui n'est pas le cas des étoiles.* » Mais pour être bien visible, notre satellite doit aussi être suffisamment haut dans le ciel et assez éloigné du Soleil. La pleine lune en revanche ne peut se voir que de nuit car à ce moment-là, la Lune, la Terre et le Soleil sont presque alignés. ■

Anne-Sophie Tassart @TassartAS

BOTANIQUE

Comment les arbres communiquent-ils entre eux ?

Clémentine B.-M.

Les arbres sont naturellement connectés entre eux par un tentaculaire réseau de champignons dont les filaments (appelés hyphes) captent les nutriments du sol pour les échanger avec les sucres fabriqués par les végétaux à partir de la photosynthèse. Cette symbiose se double de greffages entre les racines des arbres. Ces greffes s'opèrent au sein des racines d'un même individu pour assurer sa stabilité, au sein d'arbres de la même espèce et entre espèces différentes. Les arbres s'échangent ainsi de l'eau, des sucres et de la matière organique. ■

Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

TSCHAEN/SIPA

La Française Jeanne Calment a vécu 122 ans, 5 mois et 14 jours (ici à 120 ans).

BIOLOGIE

Jusqu'à quel âge l'être humain peut-il vivre ?

Frédéric Z.

Le record mondial de longévité humaine, 122 ans, 5 mois et 14 jours, est détenu par la Française Jeanne Calment, morte en 1997. Imbattable ? Cette question divise les scientifiques. Certains soutiennent l'idée que la durée de vie est bornée par des contraintes biologiques, comme le généticien américain Jan Vijg, dans une étude parue en 2016 : il n'y a pas eu d'amélioration de la longévité depuis la fin des années 1990. Elle serait limitée aux alentours de 115 ans. Même verdict pour une équipe russe, à partir d'un modèle établi en 2021, fondé sur les données de santé de plus de 500 000 personnes. Cependant, l'hypothèse d'une longévité limitée est contestée par d'autres démographes, dont une équipe italienne qui soutient l'idée, dans une étude publiée en 2018, que le taux de mortalité augmente avec l'âge, ralentit à partir de 85 ans et plafonne à 50 % par an vers 107 ans. Selon ce modèle, il n'y aurait donc pas de limites fixes à la longévité. Mais les démographes sont nombreux à ne pas prendre position, comme France Meslé, de l'Institut national d'études démographiques : « *Même s'ils vont en augmentant, les effectifs des générations qui arrivent à de très grands âges sont encore assez réduits et on ne peut toujours pas faire d'estimations statistiques significatives.* » Selon elle, il faudra donc attendre d'avoir suffisamment de supercentenaires (ceux ayant dépassé l'âge de 110 ans) pour pouvoir obtenir une réponse. ■

Lise Loumé @Lise_Loume

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 913, mars 2023

Autoréférence hexadécimale

0 1	8 3	1	2	5	5	9	7
1 4	9 3	7	A	8	1	B	9
2 5	A 6	7	C	7	A	2	8
3 6	B 3	2	6	D	2	5	5
4 4	C 4	F	6	5	F	A	D
5 6	D 3	C	A	C	7	B	2
6 7	E 0	B	8	9	A	4	3
7 6	F 3	C	A	F	1	D	6

Addition trouée

4237
+ 9613
= 13850

L'intrus dans la logique

E contient un octogone (8) et donc ne suit pas la logique cercle plus triangle (3), carré (4), pentagone (5), hexagone (6), heptagone (7).

Carré latin

		19	20		13	6	10	12	9	32
		18	22	40	26	36	12	21	28	8
11	27	4	7	5	2	1	6	3	9	8
35	2	1	6	3	7	5	4	9	8	2
24	9	5	4	9	6	3	1	8	2	7
12	29	3	1	8	4	9	5	2	7	6
	45	6	2	1	8	4	7	5	3	9
14	10	8	3	7	5	2	9	6	4	1
25	13	9	5	2	1	8	3	7	6	4
34	9	7	8	4	9	6	2	1	5	3
27	6	2	9	6	3	7	8	4	1	5

Musique et panique

Certains manchots sont pris de panique, qui obscurcit l'esprit, et n'ont pas l'esprit clair indispensable pour apprécier la musique, ce qui leur interdit d'être mélomanes comme les pingouins. Les manchots et les pingouins ne sont donc pas identiques.

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 905/906
Pourquoi ?
Dossier spécial

N° 907
Messages de l'univers lointain

N° 908 7 traitements qui révolutionnent la médecine

N° 909
L'avant Big Bang

N° 910
La science lit dans les pensées

N° 911
Les origines de la vie

N° 912 Climat : inverser le réchauffement, c'est possible

N° 913 Fusion nucléaire : une révolution pour l'humanité

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 905/906 ❑ N° 907 ❑ N° 908 ❑ N° 909
❑ N° 910 ❑ N° 911 ❑ N° 912 ❑ N° 913

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

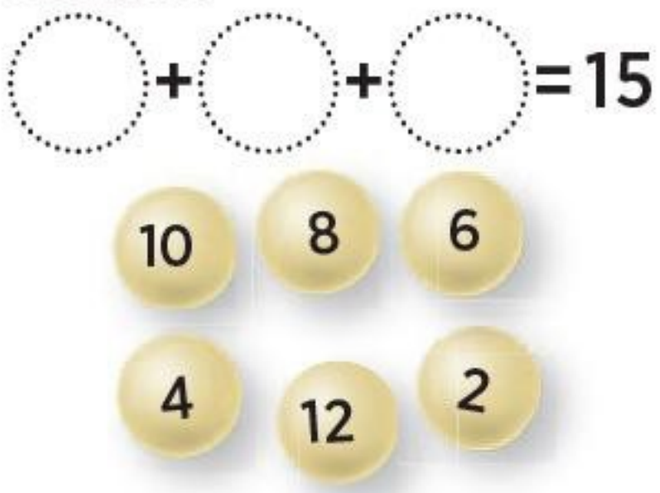
PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

La somme des boules

En additionnant trois de ces boules, obtenez 15.



Le 421 des signes

Le pouvoir des signes arithmétiques de base + - x et / est tel qu'ils peuvent s'intercaler entre 1 2 3 4 5 6 7 8 9, mis dans l'ordre qui leur chante, et avec les parenthèses qui leur conviennent, pour obtenir exactement 421.

Quoi, un intrus ?

Quel mot dérange dans cet ensemble ?

CLÔTURER, BURNOUS, MORFONDU, DÉJEUNER, VOILIER, BELLE-DE-NUIT, VOUSSOIR, CACATOIS

Logique de nom

Mon nom est un mot courant de la langue française en quatre lettres.

RIEZ, TARI et TAON contiennent chacun deux lettres de mon nom, mais pas à la bonne place. Par contre, TEST ne contient aucune lettre de mon nom. Quel est mon nom ?

Cryptarithmie

Saurez-vous remplacer chaque lettre de cette opération symbolique par un chiffre pour que l'opération soit juste ?

```
  N E U F
+ D E U X
---------
= O N Z E
```

Matoku 8x8

Dans ce carré, chaque ligne et chaque colonne comprennent une seule fois les nombres de 1 à 8.

Les nombres en coin donnent le résultat de l'opérateur sur la zone de même couleur.

Les opérateurs sont, outre +, -, x, /, S pour suite et M pour moyenne.

Sans opérateur, c'est le nombre.

19+	12+			4M		50x	
			28+				
						5M	
5,5M		40x		5-			
			8	24+		15+	
S							
120x					168x	21+	
	4/						

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

LABORATOIRES ILAPHARM

Pour une santé chaque jour renforcée !

A vos côtés, pour votre santé !

Depuis 1992, nous vous offrons le meilleur des plantes, vitamines et minéraux, pour une santé chaque jour renforcée !

OFFRE DÉCOUVERTE dès **5€**

CODE PRIVILÈGE : **CS441**

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables.**

6€ 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(3).*

5€ 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids.** *(1), (2), (5).*

6€ 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel.**

6€ 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

6€ 45 gélules

Ballonnement
CHARBON & FENOUIL BIO

Soulage rapidement en cas de **ballonnement** et **flatulences.** *(1), (10).*

6€ 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie.** Pour un **bon confort urinaire.**

5€ 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux.** *(6), (8).*
Allergène : **poisson.**

5€ 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** et possède un **effet cardioprotecteur.** *(7).*

6€ 30 gélules

Vigueur sexuelle
SAFRAN BIO

Le Safran Bio aide à **améliorer l'érection** et **stimule le désir sexuel.** *(2), (4).*

6€ 20 gélules

Vitalité - Immunité
GINSENG SIBÉRIEN BIO

Stimulant et **énergisant,** il aide au bon fonctionnement du **système immunitaire.**

6€ 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie.** *(1), (2), (9).*

6€ 45 gélules

Capacité sexuelle
TRIBULUS

Il favorise le **désir,** la **capacité** et les **performances sexuelles** et participe à la bonne santé des organes reproducteurs.

6€ *(2), (11).* 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité.** Ni accoutumance, ni somnolence.

6€ 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !**

5€ 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO

Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(1), (9).*

6€ 45 comprimés

Vos 3 Cadeaux

LE SET MULTI COUTEAUX

- 1 Couteau à beurre
- 1 Couteau à fromage
- 1 Hachoir à viande

OFFERT

Dimensions : *couteau à beurre 16 cm, couteau à fromage 23,5 cm et hachoir à viande 22 cm.*
Matières : *lame inox et manche en PU.*

+

Les Frais de Port
Dès 15€ d'achat
OFFERTS

0€

+

dès 5€ Tous vos produits

Harpagophytum BIO	5,00€
Spiruline BIO	6,00€
Huile de Courge BIO	5,00€
Safran BIO	6,00€
Maca BIO	6,00€
LE SET MULTI COUTEAUX	OFFERT
Frais de port	OFFERTS
TOTAL	**28,00€**

(1) Déconseillé aux enfants de moins de 12 ans. (2) Déconseillé aux femmes enceintes ou allaitantes. (3) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (4) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (5) Contient de la caféine (50 mg par jour). (6) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (7) Ne pas associer avec des anticoagulants. (8) Possible effet laxatif. (9) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (10) Espacez la prise de vos médicaments d'au moins 2 heures. (11) Déconseillé chez les enfants et adolescents, ou en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

BON DE COMMANDE - COMMANDE FACILE SUR WWW.ILAPHARM.COM

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Votre date d'anniversaire : |_|_| |_|_| 19|_|_|

E-mail* : .....

pour recevoir les **Offres promotionnelles par mail d'ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Recommandé pour la livraison.* de **ses partenaires ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_|_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		6€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		6€	
Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		5€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		6€	
Ginseng Sibérien BIO	PGSB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PGRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** mon **SET MULTI COUTEAUX** et mon **CATALOGUE**				OFFERTS
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 5,80€ sur les frais de port**				OFFERTS
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 5,80€**				
CODE PRIVILÈGE : **CS441**	**TOTAL À RÉGLER**			.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 5,80€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 24h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR204886_01JMKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires Ilapharm, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **réglement par chèque, avec votre bon de commande,** il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité Fevad · synadiet · Traitement Rapide 24h COLISSIMO

SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

Par téléphone :

01 49 09 11 11

Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

Par courrier :

Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

Jusqu’où peut-on aller

lorsque l’on est bien accompagné ?

Imaginer, construire, réaliser, avancer…
La vie est faite d’inspirations,
d’envies et d’objectifs à atteindre.
Nos conseillers et nos experts
vous accompagnent pour anticiper
et préparer vos projets aujourd’hui
et leur permettre de se concrétiser demain.

Prenez rendez-vous avec un conseiller sur hsbc.fr

HSBC

HSBC Continental Europe – Société anonyme au capital de 1 062 332 775 euros – SIREN 775 670 284 RCS Paris. Siège social : 38 avenue Kléber 75116 Paris. Banque et intermédiaire en assurance immatriculé auprès de l’ORIAS (Organisme pour le Registre des Intermédiaires en Assurance – orias.fr) sous le n° 07 005 894. Crédit photo : Getty Images.